

TEKNILLINEN KORKEAKOULU
Rakennus- ja maanmittaustekniikan osasto
Talonrakennustekniikka

ERKKI KIIRA

LEIKKAUSMUODONMUUTOSTEN MERKITYS
PISTEKUORMITETTUIJEN VANERILAATTOJEN JÄYKKYYTEEN

*Diplomityö, joka on opinnäytteenä
jätetty tarkastettavaksi diplomi-
insinöörin tutkintoa varten
Espoossa 18.12.1995*

Työn valvoja: Prof. Pekka Kanerva

Työn ohjaaja: DI Simo Koponen

Tekijä ja työn nimi: Erkki Kiira	
Leikkausmuodonmuutosten merkitys pistekuormitettujen vanerilaattojen jäykkyyteen.	
Päivämäärä: 18.12.1995	Sivumäärä: 94 + liitteet
Osasto: Rakennus- ja maanmittaustekniikan osasto	Professuuri: Rak-43 Talonrakennustekniikka
Työn valvoja: Professori Pekka Kanerva	
Työn ohjaaja: Diplomi-insinööri Simo Koponen	
<p>Pistekuormitettujen laattojen mitoitukseen käytetään yleisesti taulukoita, jotka eivät ota huomioon leikkausmuodonmuutoksia. Aikaisemmissa tutkimuksissa on kuitenkin todettu leikkausmuodonmuutosten osuuden taipumasta olevan esimerkiksi 18 mm koivuvanerilaatan tapauksessa noin 22 %, kun kysymyksessä on neliömäinen laatta jonka sivu on 300 mm ja kosteus 7 %. Havuvanerilla leikkausmuodonmuutosten osuus voi olla yli 50 %. Lisäksi on tutkittu vanerin muodonmuutoksia pitkäaikaiskuormituksessa ja todettu leikkausmuodonmuutosten osuuden kasvavan, kun kosteus vaihtelee.</p> <p>Tämän työn tavoitteena on tarkistaa leikkausmuodonmuutosten merkitys pistekuormitettujen vanerilaattojen jäykkyyteen.</p> <p>Työssä on esitetty kerrosrakenteiden teoria ja tarkasteltu pistekuormitettujen laattojen ratkaisua eri käsinlaskentamenetelmillä sekä elementtimenetelmään perustuvalla kaupallisella NISA-ohjelmistolla. Näiden avulla arvioitiin leikkausmuodonmuutosten merkitys lyhytaikaiskuormituksessa. Lisäksi tarkasteltiin teoreettisesti vanerin vurmista vaihtelevissa kosteusolosuhteissa ja vakiokuormituksessa.</p> <p>Kokeellisessa osassa kuormitettiin vanerilaattoja pistekuormalla eri kuormitustavoilla ja kahdessa eri kosteuspitoisuudessa (n. 11 % ja 22,5 %). Tämän lisäksi tehtiin pitkäaikaiskokeita syklisessä kosteusrasituksessa sekä pistekuormitetuille laatoille että neljännespisteistään kuormitetuille palkeille.</p> <p>Pelkän taivutuksen huomioon ottavien taulukoiden ja käyrästöjen käyttö antaa epätarkkoja tuloksia vanerilaattojen muodonmuutoksia laskettaessa. Laskettuihin taipumiin verrattuina kokeiden taipumat olivat 2-3-kertaisia. NISA-ohjelmisto puolestaan laskee kerroslaatan liukumia eri kerrosten keskimääräisiä liukukertoimia käyttäen, vaikka käytetyn liukukertoimen tulisi olla lähempänä pienempää liukukerrointa. Ohjelmistoa voidaan kuitenkin käyttää kerroslaattojen ratkaisuun, jos viilukerrosten liukukertoimina käytetään viilujen teoreettisten liukukertoimien sijasta laatan koko paksuutta vastavia näennäisiä liukukertoimia. Käytännön sovelluksissa näiden arvojen määrittäminen on kuitenkin hankalaa.</p> <p>Koska leikkausviruman määrittely ja käsittely erillään taivutuksesta on hankalaa, laadittiin kokeiden perusteella malli, jossa leikkausviruma on yhdistetty taivutusvirumaan ajasta ja kosteushistoriasta riippuvan kertoimen avulla. Laattojen leikkausmuodonmuutoksia arvioitiin neljännespisteistään taivutetuille palkeille johdetun mallin avulla. Laattojen leikkausmuodonmuutosten suhteellisen osuuden todettiin mallin ja mittaustulosten perusteella olevan hyvin lähellä samaa kuin nelipistetaivutetuilla palkeilla. Koivuvanerilla tämä osuus oli noin 26 % ja havuvanerilla se vaihteli välillä 25-35 % kokonaistaipumasta, kun koekappaleiden kosteuspitoisuus vaihteli välillä 10-22 p-%.</p> <p>Johtuen nyt käytettyjen koejärjestelyjen pienestä leikkausviruman osuudesta jatkotutkimustarpeina esitetään leikkausviruman tutkimista järjestelyillä missä leikkausmuodonmuutosten osuus on suurempi. Lisäksi ehdotetaan pistekuormitettujen laattojen kuormituskokeita vaihtelevissa lämpötiloissa.</p>	
Avainsanat: vaneri, laatta, leikkausmuodonmuutokset, taivutusjäykkyys, leikkausjäykkyys, viruma, pitkäaikaiskuormitus, kosteus	

Author and the name of the thesis: Erkki Kiira		
The effect of shearing strain on the stiffness of point loaded plywood plates.		
Date:	18.12.1995	Number of pages: 94
Faculty:	Professorship: Rak-43	
Faculty of Civil Engineering and Surveying	Structural Engineering and Building Physics	
Supervisor:	Professor	Pekka Kanerva
Instructor:	M.Sc (Eng.)	Simo Koponen
<p>The tables and diagrams generally used for the determination of point-loaded plates do not consider the effect of shearing strain. It has, however, been shown that the shearing strain accounts for 22% of the deflection of 18 mm birch plywood plates (300 mm x 300 mm, moisture content 7%). The proportion of shearing strains for spruce plywood can be as high as 50 %. Previous studies on the deformation of plywood under long-term loads have shown that the proportion of shearing strain grows when the moisture content varies. The aim of this thesis is to study the effect of shearing strain on the deflection of point loaded plywood plates.</p> <p>The first part of this thesis discusses the theory of multi-layer plates as well as the determination of point-loaded plates using various manual methods and the commercial, finite-element based NISA software. These methods are used for defining the importance of shearing strain in short-term loading. Also the creep of plywood under variable humidity and constant loads is studied theoretically.</p> <p>The experimental part of this thesis comprises loading of plywood plates in two different moisture contents (11% and 22.5%) with various loading arrangements as well as long-term experiments in variable humidity conditions with point-loaded plates and single-span beams with two point loads.</p> <p>The generally applied, table and diagram based determination methods do not consider shearing strains and thus give inaccurate results for deformation of plywood. These methods give deflections that are only one third to a half of the results of the experiments. The NISA software, on the other hand, applies an average rolling shear modulus for the various layers, although the correct modulus would be closer to the smaller of the two moduli. The software can, however, be used for the determination of multi-layer plates, when the theoretical rolling shear moduli for the veneers are replaced by the apparent modulus for the whole plate. However the determination of apparent moduli is difficult.</p> <p>Due to the difficulties in the separate determination of shearing creep and bending creep, the creep experiments are used as basis for a new model where shearing creep is combined with bending creep using a factor depending on time and humidity history. The shearing strains of point-loaded plates are estimated using a model for single-span beams with two point loads. The experiments and the model show that the proportional share of shear deflection of plates is very close to that of single-span beams with two point loads. The proportion of shear deflection for birch plywood is 26% and for spruce plywood 25-35% of the total deflection when the moisture content of test specimens is 10-22 %.</p> <p>Due to the small proportion of shearing creep in these experiments, it is suggested that future studies be concentrated on shearing creep in situations where the shearing strain is greater. Another important field for future studies is the point-loading of plates under variable temperatures.</p>		
Keywords:	plywood, plate, shearing strain, bending stiffness, shear stiffness, creep, long-term loading, varying humidity, moisture content	

ALKUSANAT

Tämä diplomityö on tehty Teknillisen korkeakoulun Rakennus- ja maanmittaustekniikan osastolla rakennetekniikan laitoksella. Työ on osa TEKES:in, Schauman Wood Oy:n ja Finnforest Oy:n rahoittamaa tutkimusta "Kerroksellisten komposiittilevyjen mekaanisten ja kosteusteknisten ominaisuuksien mallittaminen".

*Työn valvojana toimi professori Pekka Kanerva, josta hänelle kiitokset.
Työn ohjaajaana toimi diplomi-insinööri Simo Koponen. Hänelle esitän kiitokseni hyvistä neuvoista ja keskusteluista, joita työn tekemisen aikana sain.*

Lisäksi haluan kiittää diplomi-insinöörejä Maaria Lehtinen ja Jari Rekonen, jotka avustivat kokeiden alkuun saattamisessa ja opastivat laitteiden käytössä. Lauri Sipilää kiitän avusta koekappaleiden ja kosteusnäytteiden valmistamisesta.

Espoo
18. joulukuuta 1995


Erkki Kiira

SISÄLLYSLUETTELO

TIIVISTELMÄ	2
ABSTRACT	3
ALKUSANAT	4
SISÄLLYSLUETTELO	5
KÄYTETYT MERKINNÄT	8
1. JOHDANTO	10
1.1. TAUSTA	10
1.2. TAVOITE	11
2. VANERILEVYT	12
2.1. YLEISTÄ	12
2.1.1. Vanerilevytyypit	12
2.1.2. Vanerilevyjen mitat	12
2.1.3. Laatuluokat	12
2.2. VANERILEVYJEN KÄYTTÖ LAATTOINA	13
3. VANERIN KIMMO- JA LUJUUSOMINAISUUDET	14
3.1. VANERIVIILUT	14
3.1.1. Ortotropia	14
3.1.2. Vaneriviilujen lujuusarvot	15
3.2. VANERILEVYT	19
3.2.1. Vanerilevyjen lujuusarvot	19
4. PISTEKUORMITETTUIJEN VANERILAATTOJEN MITOITUSMENETELMÄT	25
4.1. LAATTOJEN YLEISET RATKAISUYHTÄLÖT	25
4.2. KÄYTÄNNÖN RATKAISUMENETELMÄT PISTEKUORMITETUILE LAATOILLE	28
5. PUUN JA VANERIN VIRUMINEN	32
5.1. YLEISTÄ	32
5.2. VANERIN VIRUMINEN VAKIOKOSTEUEDESSA	33
5.2.1. Lineaarinen viskoelastisuus	33
5.3. VANERIN VIRUMINEN VAIHTELEVASSA KOSTEUEDESSA	34
5.3.1. Koivuvanerin taivutusviruma	34
5.3.2. Havuvanerin taivutusviruma	34
5.3.3. Koivuvanerin leikkausviruma	34
5.3.4. Havuvanerin leikkausviruma	34

5.4.	VANERIRAKENTEEN VIRUMAN MATEMAATTINEN MALLI.....	35
5.4.1.	Kumulatiivinen malli.....	35
5.4.2.	Maksimimalli.....	37
6.	KOEJÄRJESTELYT	38
6.1.	LYHYTAIKAISKOKEET	38
6.1.1.	Koelaitteisto ja järjestelyt	38
6.1.2.	Koekappaleet	39
6.1.3.	Koekappaleiden säilytys ja ilmastointi	39
6.1.4.	Koekappaleiden määrät ja mitat.....	40
6.2.	PITKÄAIKAISKOKEET.....	41
6.2.1.	Koelaitteisto ja järjestelyt	41
6.2.2.	Koekappaleiden vanerityypit ja määrät.....	42
7.	KOKEIDEN TULOKSET	44
7.1.	LYHYTAIKAISKOKEIDEN TULOKSET.....	44
7.1.1.	Pistekuormitetut laatat	44
7.2.	PITKÄAIKAISKOKEIDEN TULOKSET	52
7.2.1.	Säähuoneen olosuhteet ja kappaleiden kosteuspitoisuus.....	52
7.2.2.	Pistekuormitetut laatat	52
7.2.3.	Nelipistetaivutus.....	54
8.	NISA-FEM LASKENTA.....	57
8.1.	MALLIN LUOMINEN.....	57
8.1.1.	Geometria ja reunaehdot	57
8.1.2.	Laskennassa käytetyt vakiot	58
8.2.	LASKENNAN TULOKSET	62
9.	TULOSTEN ANALYSOINTI.....	64
9.1.	ERI LASKENTAMENETELMIEN TARKKUUS MUODONMUUTOSTEN LASKENNASSA.....	64
9.1.1.	Käsinlaskentamenetelmät.....	64
9.1.2.	NISA-laskenta	64
9.2.	LYHYTAIKAISKOKEIDEN TULOSTEN TARKASTELU	65
9.2.1.	Jännevälin vaikutus pistekuormitetun laatan murtolujuuteen ja leikkausmuodonmuutoksiin.....	65
9.2.2.	Laatan paksuuden vaikutus pistekuormitetun laatan murtolujuuteen ja leikkausmuodonmuutoksiin	66
9.2.3.	Kosteuden vaikutus pistekuormitetun laatan murtolujuuteen ja leikkausmuodonmuutoksiin.....	67

9.2.4.	Jännevälin ja paksuuden yhteisvaikutus murtolujuuteen	68
9.2.5.	Kuormitustapauksen vaikutus murtolujuuksiin ja leikkausmuodonmuutoksiin	69
9.3.	PITKÄAIKAISKOKEET	69
9.3.1.	Suhteellinen viruma kosteuspitoisuuden funktiona	69
10.	VIRUMAMALLIN KEHITTÄMINEN	72
10.1.	LÄHTÖKOHDAT	72
10.2.	NELIPISTETAIVUTUS	73
10.2.1.	Neljännespisteistään kuormitettu palkki	73
10.2.2.	Koekappaleiden leikkausmuodonmuutosten riippuvuus kosteuspitoisuudesta	73
10.2.3.	Leikkausmuodonmuutosten empiirinen malli	75
10.2.4.	Koekappaleiden suhteellinen viruma ja leikkausmuodonmuu- tosten osuuden yhdistäminen taivutusviruman virumamalliin	79
10.3.	LAATTOJEN VIRUMAMALLI	84
11.	PÄÄTELMÄT	86
11.1.	LYHYTAIKAISKOKEET JA LASKENTAMENETELMÄT	86
11.2.	VIRUMAKOKEET JA -MALLIT	87
12.	JATKOTUTKIMUSTARVE	88
13.	YHTEENVETO	89
13.1.	VANERIEEN LUJUUSOMINAISUUDET	89
13.2.	MITOITUSMENETELMIEN TARKASTELU	89
13.3.	MURTOKUORMITUSKOKEET	90
13.4.	VIRUMAKOKEET	90
13.5.	VIRUMAMALLIT JA NIIDEN KEHITTÄMINEN	90
	KIRJALLISUUTTA	93
LIITTEET:	1. Koevanerien teoreettiset kimmokertoimet	
	2. Koekappaleiden koetulokset	
	3. Koekappaleiden voima/taipumakuvaajat	
	4. Esimerkki NISA-laskennasta	

KÄYTETYT MERKINNÄT

a^-, a^+, a^{++}, b	kosteuspitoisuudesta riippuva vakio virumamalleissa
A_0	virumafunktion palautumatonta muodonmuutosta edustava vakio
$A_1, A_2, A_3, \dots A_i$	virumafunktion vakioita
$a_1, a_2, a_3, \dots a_i$	virumafunktiossa esiintyvä eksponentti
A_{11}	vanerin vetojäykkyys pintaviilun syyn suunnassa
$A_{12}=A_{21}$	vanerin poikittaisjäykkyys vedossa
A_{22}	vanerin vetojäykkyys pintaviilun syyn suuntaa vasten kohtisuorassa suunnassa
A_{33}	vanerilevyn leikkausjäykkyys
D_{11}, D_{22}	vanerin taivutusjäykkyys pintaviilun syyn ja pintaviilua vasten kohtisuorassa suunnassa
$D_{12}=D_{21}$	vanerin poikittaisjäykkyys taivutuksessa
D_{66}	vanerin vääntöjäykkyys
E_i, E_{ii}	vanerin jäykkyysvakioiden laskennassa kulloinkin tarvittava kimmokerroin
E_x, E_y	kimmomodulit x- ja y-suunnassa
f_x	viilun vetolujuus syyn suuntaan
f_{xc}	viilun puristuslujuus syynsuuntaan
f_{xy}	viilun panelileikkauslujuus
f_y	viilun vetolujuus kohtisuoraan syyn suuntaan
f_{yc}	viilun puristuslujuus kohtisuoraan syyn suuntaan
f_{yz}	viilun rollingleikkauslujuus
G_{red}	vanerin näennäinen liukukerroin
G_{yz}, G_{zx}, G_{xy}	liukukumodulit
I_{eff}	tehollinen, kuormitus suunnan suuntaisten viilukerrosten kimmomodulien suhteella painotettu jäyhyysmomentti
$J(t)$	virumafunktio
K, K_0	virumamallien kaavoissa esiintyvä kosteudesta riippuva termi
L, l	jänneväli
$m(t)$	momentin aiheuttaman taipuman suhteellinen osuus kokonaistaipumasta ajan ja kosteuspitoisuuden funktiona
m_0	kappaleen massa kuivana
m_u	kappaleen massa kosteana
M_x, M_y, M_{xy}	y- ja x-akselin ympäri vaikuttavat taivutusmomentit ja vääntömomentti
MXX, MYY	x- ja y-akselin ympäri vaikuttavat momentit NISA-laskennassa
$NUXY$	suppeumakerroin v_{ft} NISA-laskennassa

N_{UXZ}	suppeumakerroin v_{lr} NISA-laskennassa
N_{UYZ}	suppeumakerroin v_{tr} NISA-laskennassa
N_x, N_y, N_{xy}	vanerilaatan x- ja y-suuntaiset sekä xy-tasossa vaikuttavat voimat leveysyksikköä kohden
P	pistekuorma
q	kuormitus
$q(t)$	leikkausmuodonmuutosten suhteellinen osuus taipumasta ajan ja kosteuspitoisuuden funktiona
Q_x, Q_y	leikkausvoimat leveysyksikköä kohden
Rot_x, Rot_y	kiertymät x- ja y-suuntaisen suoran ympäri
S_{11}	vanerilaatan leikkausjäykkyys pintaviilun syyn suunnassa
S_{22}	vanerilaatan leikkausjäykkyys pintaviilun syyn suuntaa vasten kohtisuorassa suunnassa
S_E	keskihajonta
S_{XX}, S_{YY}	x- ja y-suuntaiset leikkausvoimat NISA-laskennassa
t	aika
t	viilun paksuus, laatan paksuus
u	kappaleen kosteuspitoisuus painoprosentteina tai kosteussuhde
u_x, u_z, u_{xz}	siirtymät NISA-laskennassa
U_u	kappaleen tilavuus kosteana
w	taipuma
w_1	nelipistekuormitetun palkin keskipisteen ka kuormituspisteen taipuman erotus
w_2	nelipistekuormitetun palkin kuormituspisteiden taipuma
w_M	momentin aiheuttama taipuma
w_Q	leikkausvoiman aiheuttama taipuma
z_k, z_j	viilun keskitason etäisyys vanerin keskitasosta
α	pistekuormitetun laatan taipuman laskemisessa tarvittava kerroin
β	laatan taivutusmomentin laskemisessa tarvittava kerroin
ϵ_x, ϵ_y	muodonmuutokset x- ja y-suunnassa
$\gamma_{yz}, \gamma_{zx}, \gamma_{xy}$	leikkausvoiman aiheuttamat liukumät
K_x, K_y, K_{xy}	momentteja M_x, M_y ja M_{xy} vastaavat käyritykset
$v_{xy}, v_{yx}, \dots, v_{ij}$	suppeumakerroin eli Poissonin vakio, kun voima vaikuttaa i-suunnassa ja suppeuma on j-suuntainen
ρ	tiheys
$\sigma_x, \sigma_y, \sigma_z$	jännitykset x-, y- ja z-suunnissa
$\tau_{yz}, \tau_{zx}, \tau_{xy}$	leikkausjännitykset

1. JOHDANTO

1.1. TAUSTA

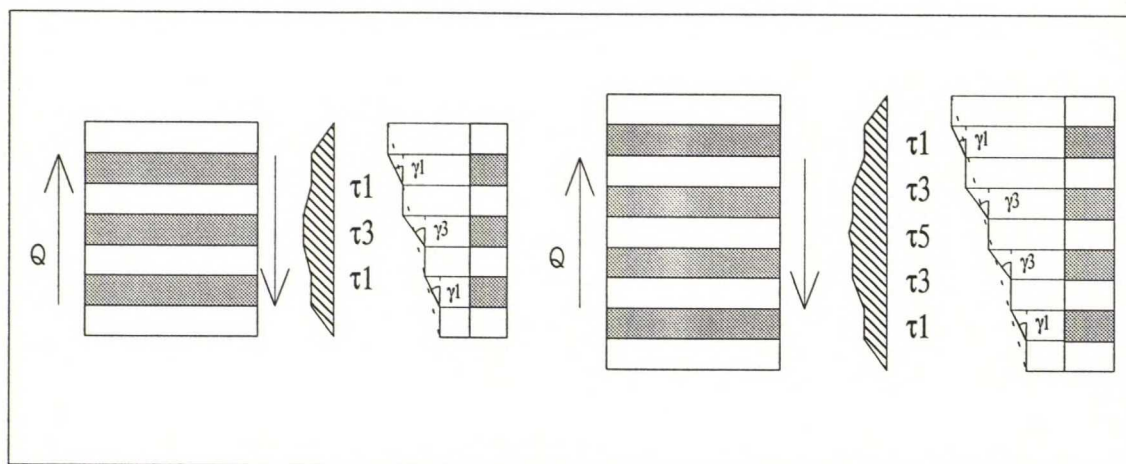
Vaneri on rakenteellisesti ortotrooppinen materiaali, jonka jäykkyys on erilainen eri taivutussuunnissa. Laattojen mitoituksessa ei leikkausmuodonmuutoksia yleensä huomioida riittävästi, koska nykyisin yleisesti käytössä olevat taulukkomitoitusmenetelmät perustuvat homogenisoituihin taivutuskimmokertoimien arvoihin eivätkä ota huomioon leikkausvoiman vaikutusta. Laattarakenteissa käytetään usein paksua vaneria ja laatat mitoitetaan yleensä isotrooppisen teorian avulla, koska erisuuntaisten taivutusjäykkyyksien ero ei paksuilla vanereilla ole kovin suuri. Ohuita vanereita tai suunnattuja erikoisvanereita käytettäessä voi jäykkyyksien ero eri suunnissa kuitenkin olla hyvinkin suuri ja toisaalta poikittaisten viilujen leikkausmuodonmuutosten osuus voi kasvaa merkittäväksi. Samoin on myös muilla ominaisuuksiltaan ortotrooppisilla puulevyillä, kuten Kerto-Q:lla. Näillä jäykkyysominaisuuksiltaan eri suuntiin erilaisilla rakenteilla saattaa leikkausmuodonmuutosten merkitys taipumiin olla huomattava jo tavanomaisilla jänneväleillä.

Nykyisten puurakenteiden suunnitteluohjeiden RIL 120-1991 /22/ mukaan vanerirakenteiden veto-, puristus ja taivutusarvoja laskettaessa otetaan huomioon vain rasituksen suuntaiset viilut. Tällöin tehollisena poikkipintana käytetään vain niitä viiluja joiden syyn suunta yhtyy kuormitussuuntaan. Suunnitteluohjeissa ei kuitenkaan ole vanerille tai vaneriviilun tasoleikkaukselle liukumodulin arvoa. Ohjeessa on annettu ainoastaan saumaleikkauslujuus viilulle ja panelileikkauksen liukukerroin vanerille, joka on sama riippumatta vanerin paksuudesta. Näin ollen suunnitteluohjeista saatavilla arvoilla ei voi tarkasti laskea leikkausvoimista aiheutuvia muodonmuutoksia. Kuitenkin viiluja vastaan kohtisuorassa suunnassa olevalla liukumodulilla G_{tr} eli *rollingliukukertoimella* on suuri merkitys laskettaessa vanerin taipumia, kun voima vaikuttaa vanerin tasoa vasten. Esimerkiksi Rautakorpi /19/ esittää pistekuormitetuille vanerilaatoille käyrästöjä, joiden mukaan leikkausmuodonmuutosten osuus kokonaistaipumista kasvaa jopa suuremmaksi kuin momentista aiheutuvat taipumat.

Suomen vaneriyhdistyksen laatimassa mitoituskäsikirjassa Handbook of Finnish Plywood /2/ ja SFS-standardeissa /24//25//26/ on taulukoituna vanereiden lujuusarvoja ja kimmokertoimia vedolle, taivutukselle ja puristukselle. Kimmokertoimet on näissä ilmoitettu vanerin keskimääräisinä, koko rakenteelle laskettuina arvoina. Käsikirjan lujuusarvot on annettu sallittuina jännityksinä ja standardien lujuusarvot ominaislujuuksina. Lisäksi näissä lähteissä on annettu arvoja Rolling Shear -liukukertoimelle ja -lujuuksille. Ne on kuitenkin esitetty vain vanerin puulajista riippuvina eivätkä millään tavalla ota huomioon vanerin viilurakennetta, millä on vaikutusta erityisesti näennäiseen liukukertoimeen. Arvot on lisäksi määritetty lyhytaikaiskokeissa eikä niissä ole huomioitu viskoelastisia ja plastisia muodonmuutoksia. Näiden lisäksi Handbbook of Finnish Plywoodissa on taulukoitu yksi- ja kaksiaukkoisille laatoille sallittuja voima- ja taipuma-arvoja sekä tasaiselle kuormalle että pistekuormille.

Koska nykyiset suunnittelun apuna olevat ohjeet antavat vanerin leikkausominaisuuksille vain keskimääräisiä, vanerin rakenteesta riippumattomia arvoja, voidaan todeta, että nykyis-

ten suunnitteluohjeiden mukaisesti laskettaessa leikkausmuodonmuutoksien osuutta aliarvioidaan. Leikkausjännityksen jakaantumisesta ja eri kerrosten erilaisista lujuusominaisuuksista johtuen mitoittava jännitys ei kuitenkaan välttämättä ole maksimijännitys vanerin keskitasossa, vaan leikkauslujuus saattaa ylittyä jo jossain muussa viilussa (kuva 1). Mitoittavan viilukerroksen sijainti voi riippua myös vanerin kuormitus suunnasta.



Kuva 1. Leikkausvoiman Q aiheuttamat jännitykset ja muodonmuutokset 7- ja 9-viiluisilla vanereilla.

1.2. TAVOITE

Vanerin käytön tehostaminen erikoistuotteissa edellyttää hyviä ja tehokkaita mitoitusmenetelmiä. Hyvillä mitoitusmenetelmillä on mahdollista nopeuttaa ja halventaa tuotekehitystä, sillä nykyisin tuotekehityksessä joudutaan käyttämään koestuksia laskennallisten tarkastelujen sijasta.

Tämän diplomityön tavoitteena on perehdyttää laattateorioihin ja kartoittaa laattojen käsinlaskentamenetelmiä. Työssä tarkastellaan laskennassa käytettäviä materiaaliparametreja ja erityisesti kosteuden vaikutusta niihin eri normien, standardien ja aikaisempien kokeiden mukaan. Lisäksi testataan elementtimenetelmään perustuvan kaupallisen NISA-ohjelmiston soveltuvuutta pistekuormitettujen laattojen ratkaisemiseen eri kosteuspiitoisuuksissa.

Työssä tehtävien murtokuormituskokeiden tavoitteena on verrata niissä mitattuja muodonmuutosten ja lujuuksien arvoja käytettävissä olevilla mitoitusmenetelmillä saataviin arvoihin. Leikkausmuodonmuutosten merkitystä arvioidaan perustuen vertailuun koetulosten ja leikkausmuodonmuutoksia huomioimattomien laskentamenetelmien välillä.

Hetkellisten kuormitusten lisäksi tarkastellaan myös vanerilaattojen virumista syklisessä kosteusrasituksessa. Virumakokeiden tuloksia verrataan olemassa oleviin virumamalleihin ja kokeiden perusteella malleja kehitetään edelleen. Koska pistekuormitettujen laattojen leikkausmuodonmuutosten osuutta ei pitkäaikaikuormituksessa voi määrittää taipumamittausten perusteella, niiden suuruutta arvioidaan laadittavan mallin ja nelipistekuormitettujen vertailupalkkien avulla.

2. VANERILEVYT

2.1. YLEISTÄ

2.1.1. Vanerilevytyypit

Vanerit valmistetaan liimaamalla yhteen päällekkäin ladottuja viilukerroksia. Rakenne on yleensä symmetrinen keskimmäisen viilukerroksen suhteen. Suomalaisessa vanerissa viiluina käytetään koivu- ja havuviiluja. Koivuviilujen paksuus on yleensä aina 1,4 mm ja havuviilujen paksuudet vaihtelevat välillä 1,4-2,8 mm /3//11/. Suomalaiset vanerityypit ovat havu-, koivu- ja sekavaneri. Kotimaiset vanerit liimataan aina säänkestävällä fenolihartsiliimalla ja ns. sisävaneria toimitetaan ainoastaan erikoistilauksesta. Viilut valmistetaan tavallisimmin pituusakselinsa ympäri pyörivästä pölistä sorvaamalla. Viilujen yhteen liimaus tapahtuu kuumapuristamalla paineen ollessa 1...2 MPa ja lämpötilan +125...+130°C.

2.1.2. Vanerilevyjen mitat

Suomalaisten vanerilevyjen vakioimitat on esitetty taulukossa 1. Erikoistilauksesta on saatavissa myös muitakin kokoja. Ns. läpijatsettuna levynä on mahdollisuus saada jopa 14000×3600 mm²:n kokoisia levyjä. Vanerin kokoa ilmoitettaessa pintaviilun suuntainen mitta ilmoitetaan ensin.

Taulukko 1. Vanerilevyjen vakiokoot

NIMELLIS- PAKSUUDET: mm	LEVYKOOT: mm x mm
4	
6,5	
9	
12	1200 x 1200/2400/2500/3000/3600
15	1220 x 1220/2440/2500/3050/3660
18	1250 x 1250/2400/2500/3000/3600
21	1500 x 1500/2400/2500/3000/3600
24	1525 x 1525/2440/2500/3050/3660
27	
30	

2.1.3. Laatuluokat

Vanerit jaetaan pintaviilun ulkonäön mukaisesti viiteen eri laatuluokkaan. Laatulyhenteinä eri luokissa huonoimmasta parempaan käytetään merkintöjä E, I, II, III ja IV. Koivu- ja sekavanerilla käytetään myös merkintöjä A, B, S, BB ja WG. Parhaassa laatuluokassa pintaviilu on käytännöllisesti katsoen virheetön. Yleisin ja eniten käytetty pintalaatu on III (BB). Tässä luokassa sallitaan terveitä oksia, joiden läpimitta on 25 mm sekä muita oksia ja oksan reikiä, joiden suurin sallittu koko on 6 mm. Lisäksi sallitaan rajoitetusti myös kaikkia kysymykseen tulevia valmistusvirheitä, ei kuitenkaan samanaikaisesti. III-laatu on tarkoitettu käytettäväksi sellaisenaan erilaisissa rakenteissa ja rakenneosissa sekä maalausksitte- lyn pohjana kuivissa sisätiloissa. III-laatu on yleisimmin käytetty betonoimislevy.

2.2. VANERILEVYJEN KÄYTTÖ LAATTOINA

Vanerilevyjen suurin yksittäinen käyttösektori on rakennusteollisuus. Hintasuhteiden takia vanerin rakenteellinen käyttö on kuitenkin tähän asti ollut melko vähäistä ja vaneria käytetäänkin varsinaisessa rakennustuotannossa vain erittäin hyviä lujuusominaisuuksia vaativissa kohteissa. Käyttökohteita ovat esimerkiksi palkkirakenteet. Laattarakenteista joissa käytetään vaneria mainittakoon lattiapäällysteiden ja vesikatteiden alusrakenteet sekä erityistilojen lattiapinnat, joissa käytetään kulutuksen kestäviä levyjä. Pääosa rakennusteollisuuden käyttämästä vanerista käytetään betonointitöiden muottilevynä. Betonointimuoteissa käytettävien vanerilevyjen voidaan toiminnallisesti katsoa olevan laattoja.

Toinen merkittävä vanerin käyttäjä on kuljetusvälineteollisuus. Kuljetusvälineissä vanerit joutuvat mm. suurten pistekuormien rasittamiksi. Lisäksi vanerit joutuvat kestämiään myös kovaa kulutusta ja kosteuden vaihteluja. Kuljetusvälineteollisuudessa vanerin käyttökohteita ovat tavarajunavaunut, kuorma- ja rekka-autojen kori- ja lavarakenteet sekä linja-autojen korien sisäseinät ja lattiarakenteet. Laivanrakennusteollisuudessa vanerin käyttö on nykyisin keskittynyt erityyppisiin rahtialuksiin, sillä puulevyjä ei toisen maailmansodan jälkeen ole sallittu käytettävän matkustaja-aluksissa palovaaran takia. Taulukkoon 2 on koottu esimerkkejä vanerin käytöstä laattarakenteissa.

Taulukko 2. Esimerkkejä vanerin käyttökohteista laattana

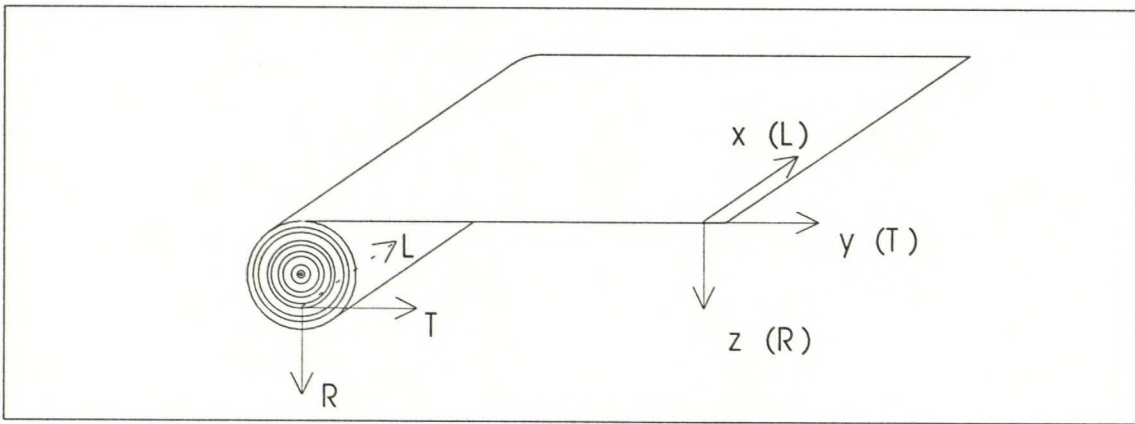
	kuormitus-tapa	kuorma	lämpötila	kosteus	vanerin rakenne	paksuus
Betonoimislevyt	tasainen	0,5-250 kN/m ²	20-60 °C	kuiva⇒ 40-60 p-%	öljytty havu valmismuoteissa filmivaneri	12-27 mm
Kuorma-autojen ja perävaunujen lattiat	pyörä 80x180 mm ² 50x50 mm ²	5-40 kN	-40-+50 °C	15-27 p-%	koivu (combi)	18-30 mm
Junavaunujen lattiat	pyörä 90x300 mm ²	20-75 kN	-50-+50 °C	15-27 p-%	koivu	24-50 mm
Laivojen lattiat	pyörä 80x180 mm ²	5-40 kN	-30-+30 °C	15-27 p-%	uritettu eri-koisvaneri	18-30 mm
Varastojen lattiat	kova pyörä pieni	5-20 kN	-25-+40 °C	15-20 p-%	koivu	9 mm kulutus 15-35 mm kantava
Talojen lattiat, aluskatteet	tasainen + piste	1,5 kN/m ² + 1,5 kN	-40-+70 °C	10-18 p-%	kuusi combi	9-21 mm
Sillat	jalankulku ajoneuvo	riippuu tapauksesta	-40-+50 °C	15-27 p-%	kaikki	9-63 mm
Kaarevat rakenteet, siilot, muotit, katot	taivutus varsinainen	riippuu tapauksesta	-40-+80 °C	10-27 p-%	kaikki	6-30 mm

3. VANERIN KIMMO- JA LUJUUSOMINAISUUDET

3.1. VANERIVIILUT

3.1.1. Ortotropia

Jos puuta tarkastellaan vuosirenkaiseen nähden pieninä kappaleina se on selvästi ortotrooppinen aine, eli kimmo- ja lujuusominaisuudet vaihtelevat suunnasta riippuen. Pienellä puukappaleella voidaan symmetriakselit merkitä syynsuuntaan (L), vuosirenkaiden tangentin suuntaan (T) ja vuosirenkaiden säteen suuntaan (R). Koska vaneriviilut valmistetaan yleensä pöllistä sorvaamalla voidaan vaneriviilujen ominaisuuksia kuvata näiden suuntaisilla arvoilla, vaikkakaan ne eivät ole samat kuin itse puulla (kuva 2).



Kuva 2. Puun ja puuviilun koordinaatistot

Jos puuviilu asetetaan xyz-koordinaatistoon siten että L-suunta yhtyy x-akselin suuntaan, T-suunta y-akselin suuntaan ja R-suunta z-akselin suuntaan ovat Hooken lain mukaan voimassa seuraavat yhtälöt tasojännitystilassa:

$$\epsilon_x = \frac{1}{E_x} \cdot \sigma_x - \frac{\nu_{yx}}{E_y} \cdot \sigma_y \quad (1)$$

$$\epsilon_y = -\frac{\nu_{xy}}{E_x} \cdot \sigma_x + \frac{1}{E_y} \cdot \sigma_y \quad (2)$$

$$\gamma_{yz} = \frac{1}{G_{yz}} \cdot \tau_{yz} \quad (3)$$

$$\gamma_{zx} = \frac{1}{G_{zx}} \cdot \tau_{zx} \quad (4)$$

$$\gamma_{xy} = \frac{1}{G_{xy}} \cdot \tau_{xy} \quad (5)$$

missä	E_x	vaneriviilun kimmomoduli syiden suuntaan
	E_y	vaneriviilun kimmomoduli kohtisuoraan syitä vastaan
	ν_{xy}, ν_{yx}	vaneriviilun Poissonin vakiot
	G_{yz}, G_{zx}, G_{xy}	leikkausmuodonmuutoksia $\gamma_{yz}, \gamma_{zx}, \gamma_{xy}$ vastaavat liukumodulit

Ratkaisemalla jännitykset yhtälöistä (1)...(5) saadaan yhtälöt:

$$\sigma_x = \frac{1}{1 - \nu_{xy} \cdot \nu_{yx}} \cdot (E_x \cdot \varepsilon_x + \nu_{yx} \cdot E_y \cdot \varepsilon_y) \quad (6)$$

$$\sigma_y = \frac{1}{1 - \nu_{xy} \cdot \nu_{yx}} \cdot (\nu_{xy} \cdot E_x \cdot \varepsilon_x + E_y \cdot \varepsilon_y) \quad (7)$$

$$\tau_{yz} = G_{yz} \cdot \gamma_{yz} \quad (8)$$

$$\tau_{zx} = G_{zx} \cdot \gamma_{zx} \quad (9)$$

$$\tau_{xy} = G_{xy} \cdot \gamma_{xy} \quad (10)$$

Jatkokäsittelyn helpottamiseksi voidaan tehdä seuraavat yksinkertaistavat oletukset:

- (1) $\nu_{xy} \cdot \nu_{yx} = 0$
- (2) $G_{zx} = \infty$
- (3) $E_y = 0$ leikkausjäykkyyksiä johdettaessa

jolloin yhtälöt (6) ja (7) voidaan kirjoittaa muotoon:

$$\sigma_x = E_x \varepsilon_x + \nu_{yx} E_y \varepsilon_y \quad (11)$$

$$\sigma_y = \nu_{xy} E_x \varepsilon_x + E_y \varepsilon_y \quad (12)$$

Oletus (2) merkitsee käytännössä sitä että leikkausmuodonmuutokset vanerilaatassa tapahtuvat vain poikittaisviiluissa. RIL 162-1 Puurakenteet I /23/ mukaan yleensä riittää kun tunnetaan kimmokerroin syiden suuntaan E_x sekä liukukerroin G_{xy} . Muut kimmovakiot ovat niin pieniä, että ne voidaan olettaa nolliksi.

3.1.2. Vaneriviilujen lujuusarvot

Vaneriviilun tärkeimmät lujuusominaisuudet ovat veto-, puristus- ja taivutuslujuus syiden suunnassa. Käytännön mitoituksessa kuitenkin tarvitaan vielä leikkauslujuuksia, joiden arvot riippuvat myös vanerin rakenteesta.

Puurakenteiden suunnitteluohjeissa RIL120 /22/ annetut vaneriviilujen ominaislujuudet, kimmomodulit ja aikavaikutuskertoimet on esitetty taulukoissa 3 ja 4. Nämä arvot perus-

tuvat ns. karakteristisiin arvoihin jotka ottavat huomioon myös arvoissa esiintyvän hajonnan ja ajan vaikutuksen niihin.

Taulukko 3. Vaneriviilujen ominaislujuuksia ja -kimmomoduleja sekä keskimääräisiä kimmomoduleja RIL 120 mukaan. Yksikkö MN/m². Aikaluokka B.

		Koivuviilu Kosteusluokka			Havuviilu Kosteusluokka		
		1	2	3	1	2	3
<i>Lujuutta laskettaessa</i>							
Taivutus	fbk	80	65	50	35	27	20
Puristus	fck	60	35	25	35	23	16
Veto	ftk	70	65	60	30	25	20
Paneelileikkaus	fvpk	10	9,0	8,0	6,5	6,0	5,0
Saumaleikkaus	fvrk	3,0	2,5	2,0	1,4	1,2	1,0
Kimmomoduli	Ek	11 000	9 100	7 200	7 700	6 500	5 400
<i>Muodonmuutoksia laskettaessa</i>							
Kimmomoduli	E	15 200	13 000	10 800	11 000	9 100	7 200
Liukumoduli *	G	550	430	270	330	260	180

* liukumoduli G_{xy}

Taulukko 4. Vanerin aikavaikutuskertoimet RIL 120 mukaan

Kuorman aikaluokka	Lujuudet	Kimmomodulit Kosteusluokka		
		1	2	3
A	0,8	0,9	0,8	0,6
B	1	1	1	1
C	1,2	1,2	1,2	1,4

Vaneriviilujen kimmo- ja lujuusominaisuudet riippuvat ajasta ja kosteudesta. RIL 120 /22/ ottaa ajan ja kosteuden vaikutuksen huomioon taulukon 4 mukaisilla kertoimilla. Viilujen kimmo-ominaisuuksien kosteusriippuvuutta on tutkittu mm. Pennalan /13/, Niskasen /12/ ja Rautakorven /17//18/ tekemissä tutkimuksissa. Näihin on koottu puuviilujen lujuusominaisuuksille seuraavia kosteusriippuvuuksia.

Koivuviilu:

- vetolujuus syyn suuntaan

f_x

116,6-2,08u

(13)

vetolujuus kohtisuoraan syyn suuntaan

f_y

0,0-0,0u

(14)

puristuslujuus syynsuuntaan

f_{xc}

88,0-2,6u

(15)

puristuslujuus kohtisuoraan syyn suuntaan

f_{yc}

15,0-0,3u

(16)

panelileikkauslujuus

f_{xy}

15,7-0,2u

(17)

rollingleikkauslujuus

f_{yz}

7,26-0,14u

(18)
- kimmokerroin syyn suuntaan

E_x

20960-306u

(19)

kimmokerroin kohtisuoraan syyn suuntaan

E_y

618-6u

(20)

paneliliukukerroin

G_{xy}

786-16u

(21)

rollingliukukerroin

G_{yz}

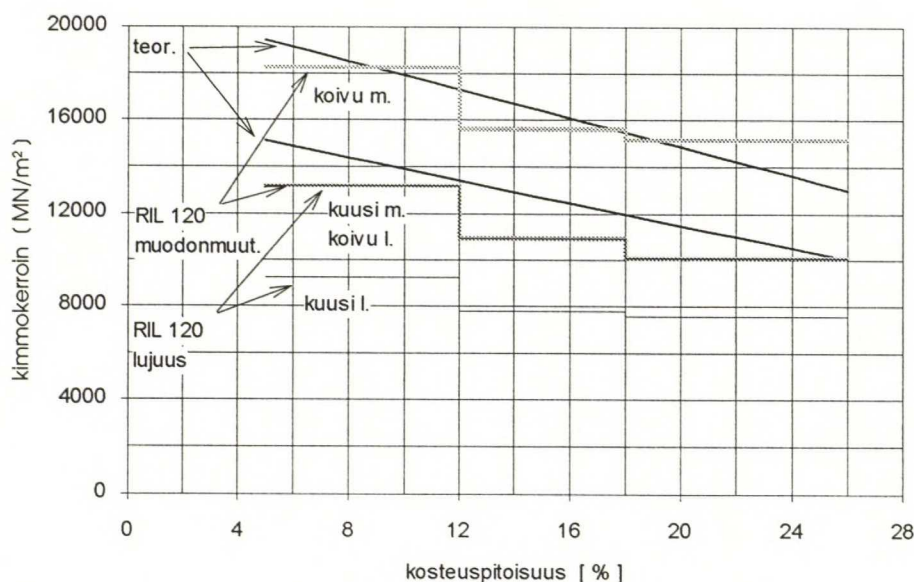
158-3,83u

(22)

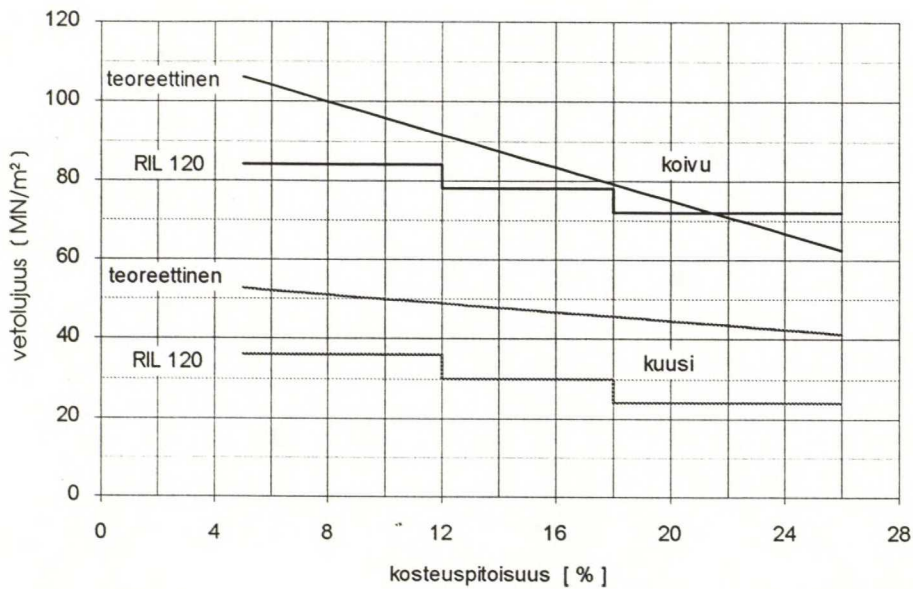
Kuusiviilu:

vetolujuus syyn suuntaan	f_x	$55,3-0,54u$	(23)
vetolujuus kohtisuoraan syyn suuntaan	f_y	$0,0-0,0u$	(24)
puristuslujuus syynsuuntaan	f_{xc}	$42-1u$	(25)
puristuslujuus kohtisuoraan syyn suuntaan	f_{yc}	$7-0,15u$	(26)
panelileikkauslujuus	f_{xy}	$13,4-0,2u$	(27)
rollingleikkauslujuus	f_{yz}	$3,4-0,05u$	(28)
kimmokerroin syyn suuntaan	E_x	$16300-241u$	(29)
kimmokerroin kohtisuoraan syyn suuntaan	E_y	$450-5u$	(30)
paneliliukukerroin	G_{xy}	$475-11,5u$	(31)
rollingliukukerroin	G_{yz}	$47,5-1,18u$	(32)

Edelläolevissa funktioissa (13-32) u on kosteuspitoisuus painoprosentteina ja yksikkönä on N/mm^2 . Funktiot pätevät vain kosteuspitoisuuksilla 7-23 p-%. Kuvissa 2 ja 3 on vertailtu näiden funktioiden mukaisesti laskettuja viulun syyn suuntaisia kimmokertoimia ja vetolujuuksia RIL 120 mukaisiin hetkellisiin arvoihin. Suunnitteluohjeen mukaan käytetään eri kimmokertoimia, kun lasketaan lujuuksia ja muodonmuutoksia, joten ne on molemmat esitetty kuvassa 3.



Kuva 3. Koivu- ja kuusiviulun syynsuuntaisen kimmokertoimen kosteusriippuvuus lujuuksia ja muodonmuutoksia laskettaessa: RIL 120 aikaluokan C ja kaavojen (19) ja (29) mukaisesti lasketut teoreettiset arvot.



Kuva 4. Koivu ja kuusiviilun syyn suuntaisen vetolujuuden kosteusrippuvuus: RIL 120 aikaluokan C ja kaavojen (13) ja (23) mukaisesti lasketut teoreettiset arvot.

Vanerin ja vaneriviilujen suppeumakertoimien arvoja ei juurikaan ole tutkittu, mutta koivu- ja kuusipuulle on kirjallisuudesta löydettävissä esim. taulukon 5 mukaisia arvoja. Kirjallisuudessa esitetty suppeumakertoimien merkitätapa vaihtelee ja tässä työssä ne on merkitty seuraavasti:

$$\nu_{ij} = -\frac{\epsilon_j}{\epsilon_i}$$

(33)

missä

ν_{ij}
 ϵ_j
 ϵ_i

on Poissonin vakio eli suppeumakerroin
j-suuntainen suppeuma, kun voima vaikuttaa i-suunnassa
i-suuntainen venymä, kun voima vaikuttaa i-suunnassa

Taulukko 5. Koivun ja kuusen Poissonin vakioita Dinwoodie /2/, Kollmann & Côté /4/ ja RIL 106 /21/ mukaan.

	KOIVU			KUUSI			
	Kollmann & Côté	Dinwoodie	RIL 106	Kollmann & Côté		Dinwoodie	RIL 106
				(Carrington)	(Stamer)		
ν_{tl}	0,017	0,018	0,0164	0,013	0,021	0,02	0,0132
ν_{rt}	0,72	0,78	0,721	0,42	0,43	0,43	0,42
ν_{lr}	0,49	0,49	0,483	0,43	0,37	0,37	0,438
ν_{lt}	0,44	0,43	0,433	0,53	0,57	0,47	0,536
ν_{tr}	0,4	0,38	0,403	0,24	0,33	0,25	0,24
ν_{rl}	0,033	0,034	0,0327	0,019	0,018	0,029	0,0189

3.2. VANERILEVYT

3.2.1. Vanerilevyjen lujuusarvot

Vaneri on rakenteellisesti ortotrooppinen aine, minkä ominaisuudet riippuvat vanerissa käytettyjen viilukerrosten lajista ja suuntauksesta. Vanerilaatan toiminta yleisessä kuormitustapauksessa voidaan esittää yhtälöillä (34)...(41), kun oletetaan, että muodonmuutokset eri kerroksissa ovat yhtäsuuria. Laatassa vaikuttavien voimien ja muodonmuutosten väliset yhtälöt saadaan kun vanerilevy asetetaan suorakulmaiseen koordinaatistoon siten, että xy-taso yhtyy vanerin keskitasoon ja pintaviilun suunta yhtyy x-akselin suuntaan (kuva 5) ja integroidaan viilujen jännitysten yhtälöt (6)...(10) vanerin paksuuden yli jolloin saadaan:

$$N_x = A_{11} \cdot \epsilon_x + A_{12} \cdot \epsilon_y \quad (34)$$

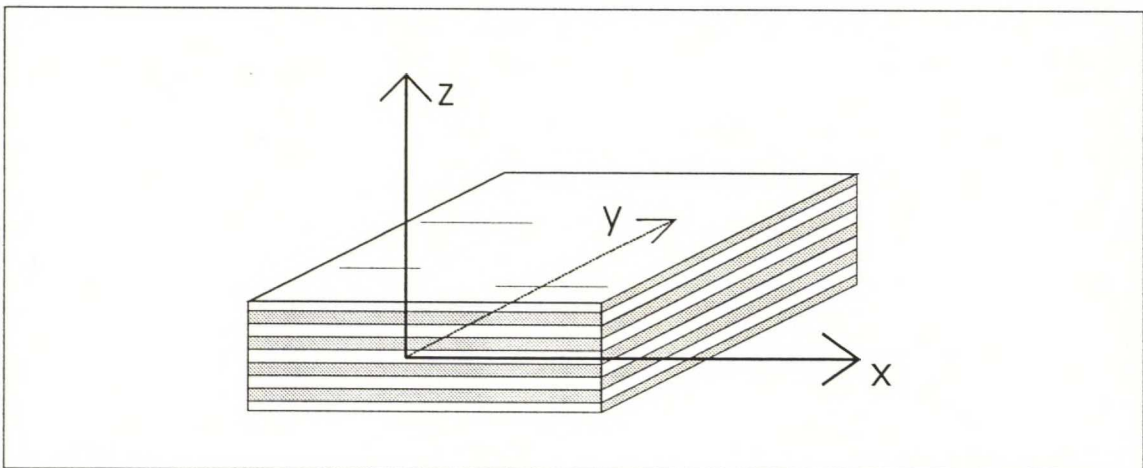
$$N_y = A_{21} \cdot \epsilon_x + A_{22} \cdot \epsilon_y \quad (35)$$

$$Q_y = S_{22} \cdot \gamma_{yz} \quad (36)$$

$$Q_x = S_{11} \cdot \gamma_{xz} \quad (37)$$

$$N_{xy} = A_{33} \cdot \gamma_{xy} \quad (38)$$

missä	N_x, N_y, N_{xy}	x- ja y-suuntaiset sekä xy-tasossa vaikuttavat voimat leveysyksikköä kohden
	$\epsilon_x, \epsilon_y, \epsilon_{xy}$	näitä vastaavat muodonmuutokset
	Q_x, Q_y	leikkausvoimat x- ja y-suunnassa
	γ_{yz}, γ_{xz}	näitä vastaavat muodonmuutokset
	$A = \int E_i dz$	vetojäykkyydet
	$S = \int G_i dz$	leikkausjäykkyydet



Kuva 5. Vanerilaatan koordinaatisto.

Vastaavasti kun yhtälöt (6), (7) ja (10) kerrotaan puolittain z :lla ja integroidaan vanerin paksuuden yli saadaan momenttien ja käyritysten välille yhtälöt:

$$M_x = D_{11} \cdot \kappa_x + D_{12} \cdot \kappa_y \quad (39)$$

$$M_y = D_{21} \cdot \kappa_x + D_{22} \cdot \kappa_y \quad (40)$$

$$M_{xy} = D_{66} \cdot \kappa_{xy} \quad (41)$$

missä M_x, M_y, M_{xy} taivutusmomentit y- ja x-akselin ympäri sekä vääntömomentti
 leveusyksikköä kohden
 $\kappa_x, \kappa_y, \kappa_{xy}$ momenteja vastaavat käyritykset
 $D = \int E_{ii} z^2 dz$ laatan jäykkyysvakioita

Kaavojen (34)...(41) jäykkyysvakiot A_{ij} , S_{ii} ja D_{ij} voidaan laskea, kun tunnetaan viilukerrosten paksuudet, kimmokertoimet ja syiden suunnat. Leikkausjäykkyys S_{ii} voidaan laskea taivutusjäykkyydestä D_{ii} yhtälöllä:

$$S_{ii} = \frac{D_{ii}^2}{\int_{-\frac{h}{2}}^{\frac{h}{2}} \frac{1}{G_{ii}} \left(\int_z^{\frac{h}{2}} E_{ii} z dz \right)^2 dz} \quad (42)$$

Rautakorpi /18/ pitää yksittäisiä viiluja kalvoina, jotka eivät ota vastaan taivutusta. Tällöin voidaan laskukaavoja yksinkertaistaa ja veto- ja taivutusjäykkyysvakiot voidaan laskea summalausekkeilla:

$$A = \sum_{k=1}^n E_{ii} \cdot t_k \quad (43)$$

$$D = \sum_{k=1}^n E_{ii} \cdot z_k^2 \cdot t_k \quad (44)$$

Poikittaiset leikkausjäykkyydet S_{ii} voidaan laskea jakamalla taivutusjäykkyyden neliö painotetulla staattisen momentin neliöllä:

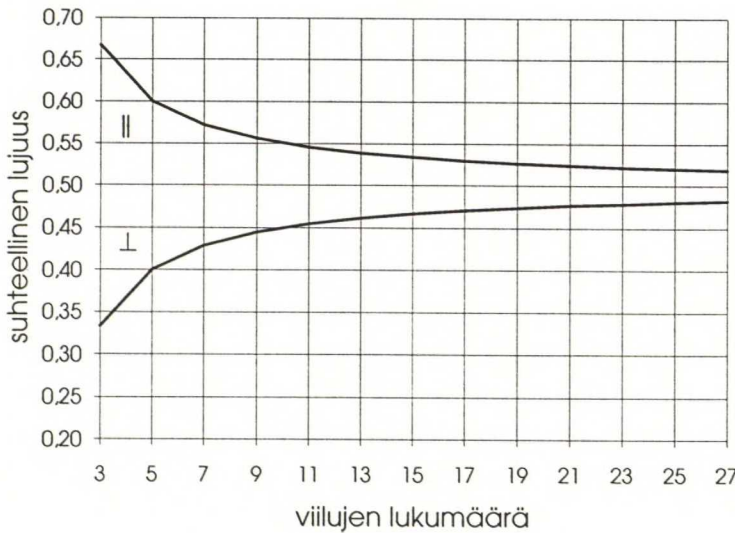
$$S_{ii} = \frac{D_{ii}^2}{\sum_{k=1}^n \frac{t_k}{G_{ii k}} \left(\sum_{j=1}^k E_{ii} t_j z_j \right)^2} \quad (45)$$

missä E_{ii} kulloinkin tarvittava kimmokerroin
 z_k, z_j viilun keskitason etäisyys xy-tasosta
 t_k viilun paksuus
 G_{ii} viilun liukukerroin G_{zx} tai G_{yz}

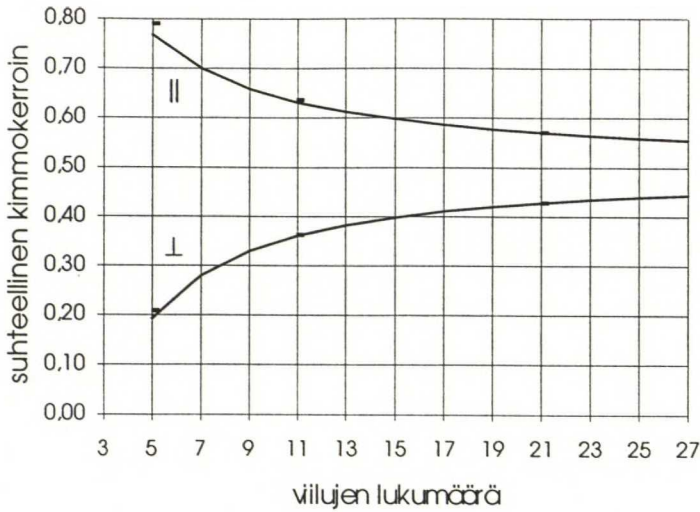
Vanerin jäykkyyksiä laskettaessa kimmokerroin E_i voidaan edellä esitetyn mukaisesti olettaa nollassa, kun viilukerroksen syyn suunta on poikittain laskentasuuntaan nähden. Laskentasuuntaan olevilla viiluilla $E_i = E_x$ eli viilun syyn suuntainen kimmokerroin. Leikkausjäykkyyden lausekkeessa esiintyvä liukukerroin G voidaan puolestaan olettaa hyvin suureksi kun viilun syyn suunta on sama kuin laskentasuunta eli tällöin $G = G_{zx} = \infty$. Laskentasuuntaan poikittain olevilla viiluilla liukukerroin on ns. rolling-liukukerroin G_{yz} . Jäykkyysvakiot voidaan vanerilla korvata näennäisillä, eli koko paksuutta vastaavilla kimmo- tai liukukertoimilla, jotka voidaan tärkeimmissä suunnissa ilmaista lausekkeilla:

$$\begin{aligned} E_x &= \frac{A_{11}}{h} && \text{vetokimmokerroin x-suunnassa} \\ E_y &= \frac{A_{22}}{h} && \text{vetokimmokerroin y-suunnassa} \\ E_x &= \frac{12 \cdot D_{11}}{h^3} && \text{taivutuskimmokerroin x-suunnassa} \\ E_y &= \frac{12 \cdot D_{22}}{h^3} && \text{taivutuskimmokerroin y-suunnassa} \\ G_{xz} &= \frac{6 \cdot S_{11}}{5 \cdot h} && \text{rolling shear liukukerroin x-suunnassa} \\ G_{yz} &= \frac{6 \cdot S_{22}}{5 \cdot h} && \text{rolling shear liukukerroin y-suunnassa} \end{aligned}$$

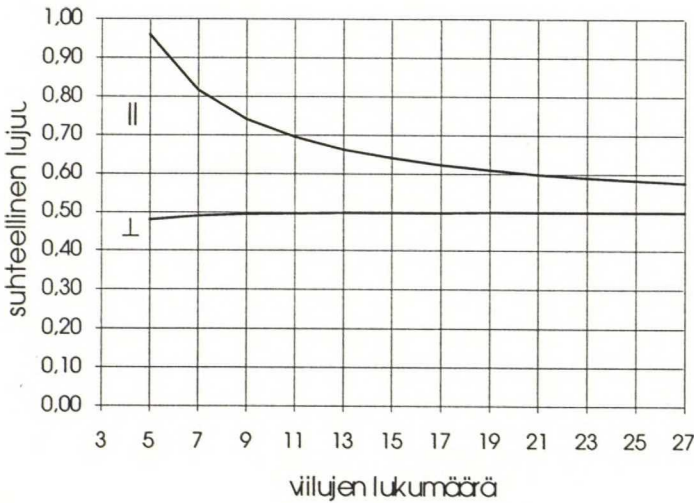
Tasapaksuista viiluista valmistetun normaalirakenteisen koivuvanerin näennäisten kimmo- ja lujuusarvojen suhteita on esitetty kuvissa 6-8. Koska kyse on suhteellisista arvoista ne pätevät myös muille tasapaksuista viiluista valmistetuille normaalivanereille. Kun otetaan huomioon viilukerrosten paksuudet ja kimmokertoimet voidaan vastaavat suhteet laskea myös muille vanerityypeille.



Kuva 6. Vanerin näennäisten veto-puristus-kimmokertoimien suhde viilun kimmokertoimeen ($A_{11}/h \cdot E_l$ ja $A_{22}/h \cdot E_l$), kun viilut ovat tasapaksuja ja vaneri normaalirakenteista ristiinliimattua (oletus $E_t = 0$).



Kuva 7. Vanerin näennäisten taivutuskimmokertoimien suhde viilun kimmokertoimeen ($12 \cdot D_{11}/E_t \cdot h^3$ ja $12 \cdot D_{22}/E_t \cdot h^3$), kun viilut ovat tasapaksuja ja vaneri normaalirakenteista ristiinliimattua (oletus $E_t=0$). Merkillä "-" lasketut suhteet ottavat huomioon myös viilun taivutusvastuksen.

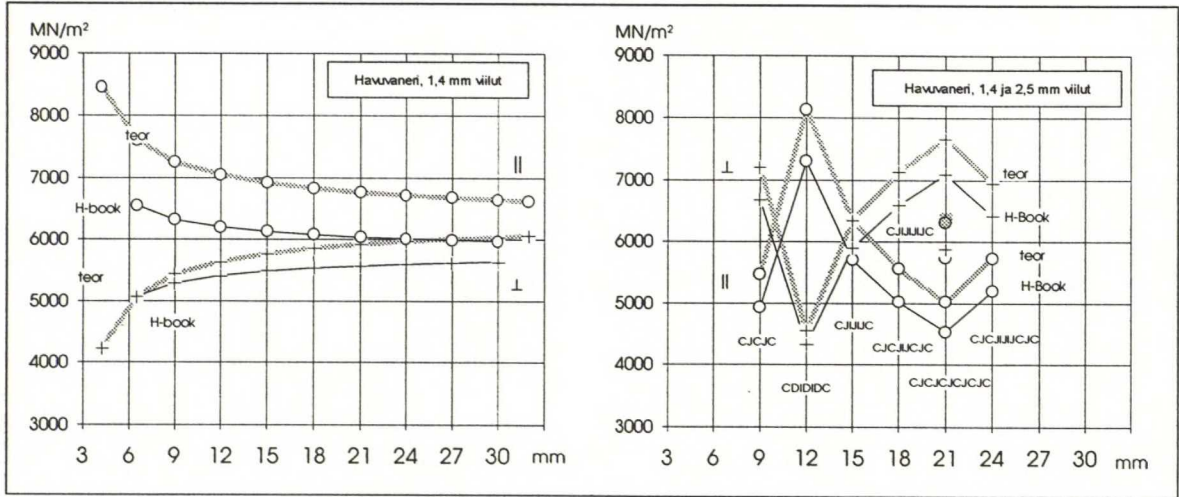


Kuva 8. Vanerin näennäisten taivutusvastusten suhde viilun taivutusvastukseen ($6 \cdot W_x/h^2$ ja $6 \cdot W_y/h^2$), kun viilut ovat tasapaksuja ja vaneri normaalirakenteista ristiinliimattua (oletus $W_t=0$).

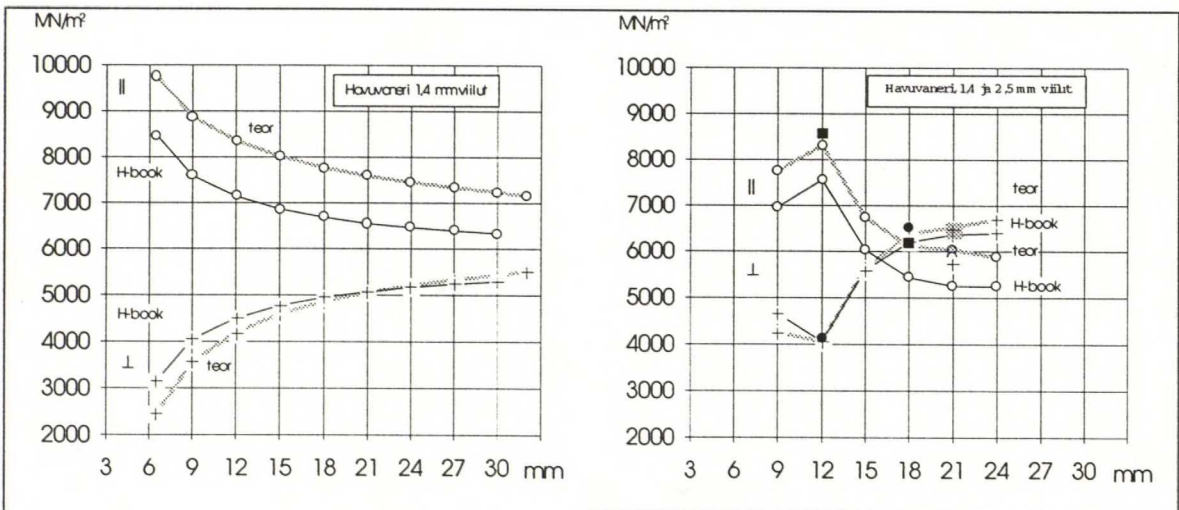
Kuvista 6-8 huomataan, että viilujen lukumäärän eli vanerin paksuuden kasvaessa vanerien ominaisuudet molemmissa pääsuunnissa lähenevät toisiaan raja-arvon ollessa 0,5. Kuviiin 9 ja 10 on laskettu havuvanerien näennäisiä kimmokertoimia kerrosrakenteen teorian mukaisesti. Laskennassa on oletettu viilun poikittaiseksi kimmokertoimeksi $E_t=0$ ja pituussuuntainen kimmokerroin kaavan (29) mukaiseksi ($E_f=12685 \text{ MN/m}^2$, $u=15\%$). Mikäli laskennassa käytetään viilun poikittaisen kimmokertoimen arvoa 375 MN/m^2 , vanerin teoreettiset kimmokertoimen arvot kasvavat n. 2-5%. Taivutuskimmokertoimen laskennassa oletetaan yksittäisten viilujen olevan kalvoja jotka eivät ota vastaan taivutusta.

Jos taivutusvastus kuitenkin otetaan huomioon, kasvavat taivutuskimmokertoimien arvot ainoastaan vähän. Kuvissa 7 ja 10 on laskettu muutama esimerkki ottaen huomioon myös

viilujen taivutusvastus. Myös näissä tapauksissa on viilujen poikittainen kimmokerroin on oletettu nolllaksi. Lasketuista vertailupisteistä huomataan, että viilun taivutusvastuksen merkitys on vähäinen. Esimerkiksi viiden tasapaksun viilun tapauksessa taivutus-kimmokerroin on noin 3 % suurempi pituussuunnassa ja poikkisuunnassa noin 8%. Vanerin paksuuden kasvaessa tämä ero kuitenkin pienenee ollen 21 viilua paksulla vanerilla ainoastaan 0,2 %. Kuviin 9 ja 10 on vertailun vuoksi piirretty myös Handbook of Finnish Plywood /2/ taulukossa 3 esitetyt kimmokertoimien kokeellisesti määritetyt arvot.



Kuva 9. Normaalin 1,4 mm viiluista valmistetun ja paksuviiluisen havuvanerin teoreettinen ja Handbook of Finnish Plywood, table 3 mukainen kimmokerroin vedolle ja puristukselle, $u=15\%$. Viilun teoreettinen kimmokerroin kaavan (29) mukaan.



Kuva 10. Havuvanerin teoreettiset ja Handbook of Finnish Plywood mukaiset taivutusimmokertoimet, $u=15\%$. Tummallä merkityt arvot ottavat huomioon myös viilun taivutusjäykkyyden. Vanerien rakenne sama kuin kuvassa 8.

Edellä olevista kuvista huomataan, että teoreettiset arvot ovat suurempia kuin Handbook of Finnish Plywoodissa esitetyt arvot vaikka teoreettiset arvot olettavat viilun poikittaisen kimmokertoimen nolllaksi. Tämä ero johtunee ainakin osittain siitä, että Handbookin arvot on esitetty 70 %:n luotettavuustasolla ja kimmokertoimien arvot siihen on laskettu kaavalla

$E = \bar{E} - 0,52 \cdot S_E$

missä E sallittu kimmomoduli
 \bar{E} kimmomodulin keskiarvo
 S_E kimmomodulin keskihajonta

Kun kuvia 9 ja 10 verrataan kuviin 6 ja 7 missä esitettiin vanerin suhteellisia kimmo-kertoimia, havaitaan että vanerin rakenteella voidaan vaikuttaa vanerin kimmo-ominaisuuksiin eri suunnissa. Tasapaksuista viiluista kootuilla vanereilla ominaisuudet eri suunnissa lähestyvät tasaisesti toisiaan pintaviilun suuntaisten kimmokertoimien ollessa suurempia. Viilun paksuutta vaihtelemalla voidaan vaikuttaa halutun suuntaisiin ominaisuuksiin siten että esimerkiksi taivutuskimmokerroin vanerin poikkisuunnassa saadaan samaksi tai jopa suuremmaksi kuin pituussuunnassa (paksuviiluininen havuvaneri, 15-24 mm). Eri viilupaksuuksien lisäksi voidaan vanerin ominaisuuksia tietyssä suunnassa säädellä myös suuntaamalla viilukerroksia halutulla tavalla normaalin ristiinliimauksen sijasta.

Vanerin tasoa vastaan kohtisuorien voimien vaikutuksesta aiheutuvien muodonmuutosten laskennassa tarvittavia liukukertoimia ei siis ole suunnitteluohjeessa RIL 120/22/. Handbook of Finnish Plywood /2/ ja standardit SFS 2417 /24/, SFS 4091 /25/ ja SFS 4092 /26/ esittävät saumaleikkaukselle viilujen suunnasta riippumattomia arvoja, jotka on tässä koottu taulukoihin 6 ja 7. Ajan ja kosteuden vaikutus taulukon 6 arvoihin otetaan huomioon mitoitusmenetelmien käsittelyn yhteydessä esitettävien taulukoiden 9 ja 10 kertoimien avulla.

Taulukko 6. Vanerin leikkausominaisuudet Handbook of Finnish Plywood mukaan.

Vanerin leikkaus- ominaisuudet u=15 %	Liukukerroin		Sallitut jännitykset		
	Panelileikkaus	Rollingleikkaus	Panelileikkaus	Rollingleikkaus	Rollingleikkaus
	ja ⊥ N/mm²	ja ⊥ N/mm²	ja ⊥ N/mm²	 N/mm²	⊥ N/mm²
Koivu	610	190	4,2	1,1	1,1
Combi	570	130	3,9	1,1	0,7
Combi Mirror	560	110	3,8	0,7	1,1
Havu, Twin	510	80	3,8	0,7	0,7

Taulukko 7. Vanerien ominaisleikkauslujuudet sekä liukukertoimien keskiarvot 15 % kosteudessa standardien SFS 2417, SFS 4091 ja SFS 4092 mukaan.

Vanerin leikkaus- ominaisuudet u=15 %	Liukukerroin		Ominaislujuus		
	Panelileikkaus	Tasoleikkaus	Panelileikkaus	Tasoleikkaus	Huom!
	N/mm²	N/mm²	N/mm²	N/mm²	
Koivu	640	110	9,8	2,5	
Seka	570	110	9,0	1,6	
	570	110	9,0	2,5	poikkiviilu havua
Havu	540	45	7,6	1,6	poikkiviilu koivua

4. PISTEKUORMITETTUIJEN VANERILAATTOJEN MITOITUSMENETELMÄT

Pistekuormitettujen vanerilaattojen mitoitukseen ei Suomen Rakennusinsinöörien Liiton julkaisemassa RIL 120 Puurakenteiden suunnitteluohjeet /22/ ole esitetty varsinaisia menetelmiä. Tämän ohjeen mukaan vanerin kapasiteettiä voidaan laskea tarkastelemalla vaneria kerroksellisena rakenteena. Veto- puristus- ja taivutusarvoja laskettaessa otetaan kuitenkin huomioon vain ne viilut joiden syyn suunta yhtyy kuormitussuuntaan eli teholliseen poikkipintaan ei lasketa poikittaisia viiluja mukaan. Liukumoduulien ja leikkauslujuuksien laskennassa vanerin poikkipinnan lasketaan toimivan kokonaan.

4.1. LAATTOJEN YLEISET RATKAISUYHTÄLÖT

Vaneri on siis ortotrooppinen aine, joten mikäli laattojen ratkaisussa haluttaisiin tarkkoja tuloksia, tulisi eri suuntaisten kimmo-ominaisuuksien erilaisuus ottaa huomioon. Suomen Rakennusinsinöörien Liiton julkaisemien käsikirjojen RIL 106 /21/ ja /RIL 162-1 /23/ mukaan riittävän tarkka tulos saadaan kuitenkin isotrooppisen laatan teorian mukaan koska laattoina käytetään yleensä paksua vaneria, jolloin kimmo-ominaisuuksien ero eri suunnissa ei ole kovin suuri. Seuraavassa on esitetty ortotrooppisen laatan differentiaaliyhtälö sekä sen erikoistapaus, isotrooppisen laatan differentiaaliyhtälö.

Ortotrooppisen laatan differentiaaliyhtälö jäykkyysvakioiden avulla kirjoitettuna on:

$$D_{11} \frac{\partial^4 w}{\partial x^4} + 2(D_{12} + 2D_{66}) \frac{\partial^4 w}{\partial x^2 \partial y^2} + D_{22} \frac{\partial^4 w}{\partial y^4} = q(x, y) \quad (46)$$

missä $w(x, y)$ laatan taipuma
 $q(x, y)$ laatan tasoa vastaan kohtisuorasti vaikuttava kuormitus
 D_{ij} laatan jäykkyysvakiot

Yhtälön (46) erikoistapauksena saadaan isotrooppisen laatan differentiaaliyhtälö kun jäykkyysvakioiksi valitaan

$$D_{11} = D_{12} + 2D_{66} = D_{22} = D = \frac{Et^3}{12(1-\nu^2)} \quad (47)$$

Tällöin yhtälö (46) voidaan kirjoittaa muotoon

$$\frac{\partial^4 w}{\partial x^4} + 2 \frac{\partial^4 w}{\partial x^2 \partial y^2} + \frac{\partial^4 w}{\partial y^4} = \frac{q}{D} \quad (48)$$

Kun edellä esitetyistä differentiaaliyhtälöistä on määritetty laatan taipuma voidaan laatua rasittavat taivutusmomentit ortotrooppisen laatan tapauksessa laskea kaavasta

$$\begin{aligned}
M_x &= -D_{11} \frac{\partial^2 w}{\partial x^2} - D_{12} \frac{\partial^2 w}{\partial y^2} \\
M_y &= -D_{22} \frac{\partial^2 w}{\partial y^2} - D_{12} \frac{\partial^2 w}{\partial x^2} \\
M_{xy} &= -2D_{66} \frac{\partial^2 w}{\partial x \partial y}
\end{aligned} \tag{49}$$

ja isotrooppisen laatan tapauksessa kaavasta

$$\begin{aligned}
M_x &= -D \left(\frac{\partial^2 w}{\partial x^2} - \nu \frac{\partial^2 w}{\partial y^2} \right) \\
M_y &= -D \left(\frac{\partial^2 w}{\partial y^2} - \nu \frac{\partial^2 w}{\partial x^2} \right) \\
M_{xy} &= -D(1 - \nu) \frac{\partial^2 w}{\partial x \partial y}
\end{aligned} \tag{50}$$

Ortotrooppisen laatan leikkausvoimille saadaan yhtälöt

$$\begin{aligned}
Q_x &= -D_{11} \frac{\partial^3 w}{\partial x^3} - (D_{12} + D_{66}) \frac{\partial^3 w}{\partial x \partial y^2} \\
Q_y &= -D_{22} \frac{\partial^3 w}{\partial y^3} - (D_{12} + D_{66}) \frac{\partial^3 w}{\partial x^2 \partial y}
\end{aligned} \tag{51}$$

ja isotrooppiselle laatalle yhtälöt

$$\begin{aligned}
Q_x &= -D \left(\frac{\partial^3 w}{\partial x^3} + (2 - \nu) \frac{\partial^3 w}{\partial x \partial y^2} \right) \\
Q_y &= -D \left(\frac{\partial^3 w}{\partial y^3} + (2 - \nu) \frac{\partial^3 w}{\partial x^2 \partial y} \right)
\end{aligned} \tag{52}$$

Laattaa rasittavat suurimmat normaaliännitykset ovat

$$\begin{aligned}
\sigma_x &= \pm \frac{6M_x}{t^2} \\
\sigma_y &= \pm \frac{6M_y}{t^2}
\end{aligned} \tag{53}$$

Laattojen suurimmat leikkausjännitykset voidaan laskea yhtälöillä:

$$\begin{aligned}\tau_{xy} &= \frac{6M_{xy}}{t^2} \\ \tau_{xz} &= \pm \frac{3Q_x}{2t} \\ \tau_{yz} &= \pm \frac{3Q_y}{2t}\end{aligned}\tag{54}$$

Leikkausjännityksistä laatan tason suuntainen leikkausjännitys τ_{xy} eli panelileikkaus ei yleensä ole määräävä laattojen mitoituksessa vaan saumaleikkausjännitykset τ_{xz} ja τ_{yz} saattavat tulla määrääviksi.

4.2. KÄYTÄNNÖN RATKAISUMENETELMÄT PISTEKUORMITETUILLE LAATOILLE

Tyypillinen vanerilaatoilla esiintyvä pistekuorma on pyöräkuorma. Tästä esimerkkejä on esitetty taulukossa 2. Pistekuormitetun laatan taivutusmomentille ja taipumalle on esitetty yksinkertaiset yhtälöt (55) ja (56) mm käsikirjassa RIL 162-1 /23/ , oppikirjassa Kantavat puurakenteet /8/ ja julkaisussa Puurakenteet 4, laskentamenetelmät /7/.

$$M = \beta F \quad (55)$$

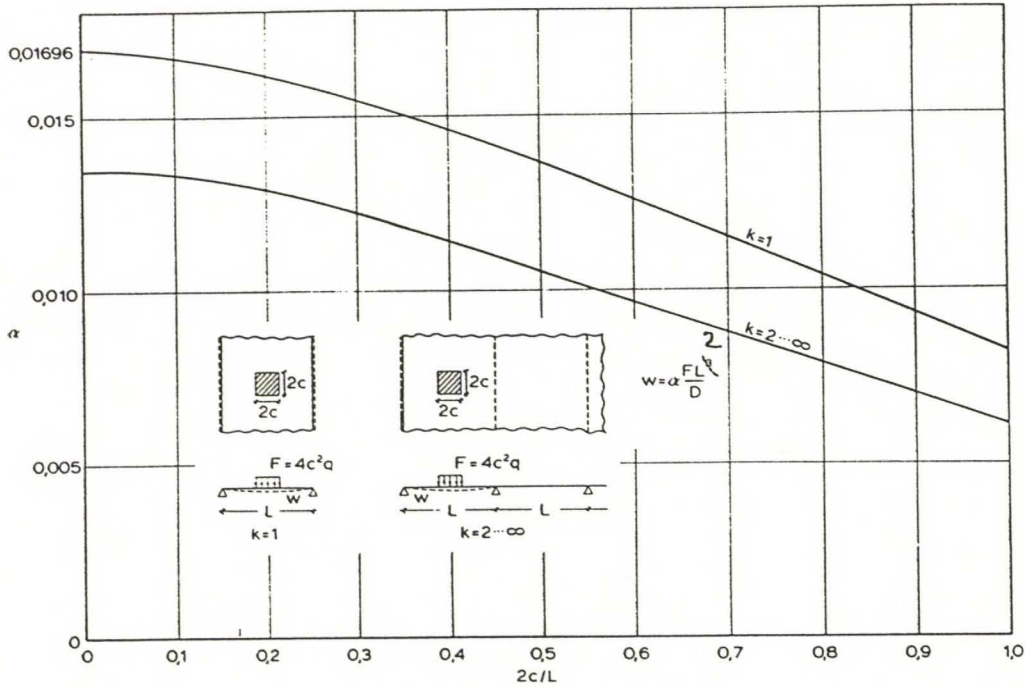
$$w = \alpha \frac{FL^2}{D} \quad (56)$$

Näitä ratkaisuja johdettaessa on käytetty isotrooppisen laatan yhtälöitä ja ns. Lévy'n ratkaisua. Leikkausmuodonmuutosten vaikutus on jätetty huomiotta. Yhtälöissä tarvittavat kertoimet α ja β saadaan valmiista käyrästäistä kuormitusalueen sivun ja jännevälin suhteen avulla (kuvat 11 ja 12). Näissä käyrästäissä laattakaistan leveydeksi on oletettu $b=\infty$ ja suppeumakertoimeksi $\nu=0$. Käsikirjassa RIL 162-2 /23/on lisäksi taulukoituna kaavan (55) momenttikertoimen β arvoja kun vanerilaatan kaikki sivut ovat vapaasti tuettuja. Rakentamismääräyskokoelman mukaisesti mitoitettaessa ja ottamalla huomioon yhtälö (47) voidaan yhtälö (56) kirjoittaa muotoon

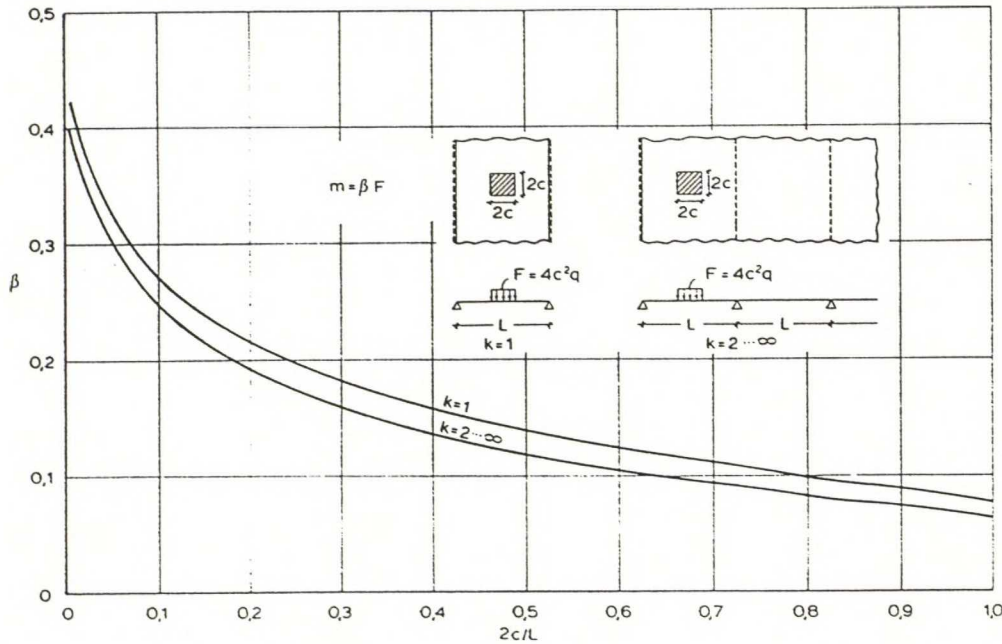
$$w = \alpha \frac{FL^2}{EI_{eff}} \quad (57)$$

missä E kimmokerroin
 I_{eff} on kuormitus suunnan (jännevälin) suuntaisten kerrosten kimmomodulien suhteella painotettu jäyhyysmomentti

Kaavan (57) kimmokertoimena voidaan käyttää taulukosta 3 saatavia kimmokertoimia tarvittavalla aikavaikutuskertoimilla kerrottuna. I_{eff} voidaan laskea Steinerin säännön avulla ottamalla huomioon viilujen suuntaus ja puulaji. Normien mukaisesti on poikittaisten viilujen kimmokerroin oletettava nolaksi. Sekavanerin taipumia laskettaessa voidaan viilun kimmokertoimen perusarvona käyttää joko koivun tai havun kimmokerrointa. Tällöin tehollisen jäyhyysmomentin laskennassa voidaan viilun puulaji ottaa huomioon painottamalla sitä ao. viilukerroksen ja peruskimmokertoimen suhteella. D :n arvona voidaan käyttää arvoa EI , missä E on taulukoista saatava homogenisoitu kimmokerroin ja I on normaaliin tapaan laskettu jäyhyysmomentti.



Kuva 11. Leimakuorman aiheuttama suurin taipuma kuormitusalueen sivun ja jännevälin suhteen funktiona yksiaukkoiselle ja jatkuvalle laatastolle.



Kuva 12. Leimakuorman aiheuttama suurin taivutusmomentti kuormitusalueen sivun ja jännevälin suhteen funktiona yksiaukkoiselle ja jatkuvalle laatastolle.

Käsikirjassa Handbbbook of Finnish Plywood /2/ on taulukoituna valmiiksi laskettuja sallittujen taipumien ja kuormitusten arvoja suomalaisille standardirakenteisille 1,4 mm viiluista konstruoiduille koivu- havu- ja sekavanereille. Käsikirjan mukaan twin- ja paksu-

viiluhavuvanereille voidaan käyttää samoja arvoja vaikka vanerit eivät täysin vastaa toisiaan. Taulukoihin on laskettu arvoja yksiaukkoiselle, kaksiaukkoiselle ja neljältä sivulta vapaasti tuetulle laatalle. Arvot on laskettu sekä tasaiselle kuormalle että jänneväleihin nähden keskeiselle pistekuormalle. Taulukoiden lujuusarvot on laskettu pitkäaikaiselle (>1 vuosi) kuormalle ja taipuma-arvot on annettu hetkelliselle (< 10 tuntia) kuormalle.

Käsikirjan taulukoista on tähän koottu arvot molemmista kentistään keskeisesti kuormite-
tuille koivu- ja havuvanerille (taulukko 8). Esimerkkitaulukon kuormitustapaukset ja
vanerilajit ovat samoja kuin osassa nyt tehdyissä kokeissa. Handbook of Finnish Plywoodin
taulukoiden arvoja voidaan käyttää sellaisenaan, mikäli laatalle ei aseteta taipumarajoitusta.
Jos laatalle on asetettu taipumarajoitus voidaan sallittu kuorma laskea kaavalla:

$$q_{sal} = \frac{w_{sal}}{w_{max}} \cdot q_{max}$$

(58)

- missä
- q_{sal}

on sallittu kuorma

q_{max}

on taulukosta saatava maksimikuorma

w_{sal}

on sallittu taipuma

w_{max}

on taulukosta saatava maksimitaipuma

Ajan vaikutus otetaan huomioon aikavaikutuskertoimilla jotka on käsikirjassa taulukoitu
erikseen lujuuksille ja muodonmuutoksille. Aikavaikutuskertoimet on tässä koottu tauluk-
koon 9. Käsikirja ei jaa käyttöolosuhteita eri kosteusluokkiin vaan siinä esitetään korjaus-
kertoimet ainoastaan kosteille olosuhteille (vanerin kosteus 27 %). Korjauskertoimet on esi-
tetty taulukossa 10.

Taulukko 8. Molemmista kentistään pistekuormitetun kaksiaukkoisen vanerilaatan sallitut kuormat ja
näitä kuormia vastaavat sallitut taipumat koivu- ja havuvanerille Handbook of Finnish
Plywood mukaan. Leikkausmuodonmuutoksia ei ole huomioitu.

VAPAASTI TUETTU KAKSIAUKKOINEN LAATTA										kosteus 15 % 1,4 mm viilurakenne pistekuorma q kN (50x50 mm²) taipuma w mm									
PISTEKUORMA KUMMANKIN KENTÄN KESKELLÄ																			
s= taivutusjännitys rajoittaa																			
t= saumaleikkausjännitys rajoittaa																			
nimellispaksuus		9		12		15		18		21		24		27		30			
	l	q	w	q	w	q	w	q	w	q	w	q	w	q	w	q	w		
koivuvaneri	300	1,0s	1,2	1,5s	0,9	2,1s	0,7	2,9s	0,6	3,5t	0,5	3,9t	0,4	4,3t	0,3	4,8t	0,2		
	400	1,0s	2,1	1,5s	1,6	2,1s	1,3	2,9s	1,1	3,8s	0,9	4,8s	0,8	5,8t	0,7	6,4t	0,6		
	500	1,0s	3,3	1,5s	2,4	2,1s	2,0	2,9s	1,7	3,8s	1,4	4,8s	1,2	5,9s	1,1	7,1s	1,0		
	600	1,0s	4,7	1,5s	3,5	2,1s	2,8	2,9s	2,4	3,8s	2,0	4,8s	1,8	5,9s	1,6	7,1s	1,4		
	800			1,5s	6,2	2,1s	5,0	2,9s	4,2	3,8s	3,6	4,8s	3,2	5,9s	2,8	7,1s	2,5		
	1000					2,1s	7,9	2,9s	6,6	3,8s	5,7	4,8s	5,0	5,9s	4,4	7,1s	4,0		
	1200									3,8s	8,1	4,8s	7,2	5,9s	6,4	7,1s	5,7		
	1500											4,8s	11,2	5,9s	10,0	7,1s	9,0		
havuvanereri	300	0,6s	0,9	0,8s	0,6	1,2s	0,5	1,6s	0,4	2,1s	0,4	2,5t	0,3	2,8t	0,2	3,0t	0,2		
	400	0,6s	1,5	0,8s	1,2	1,2s	0,9	1,6s	0,8	2,1s	0,7	2,7s	0,6	3,3s	0,5	3,9s	0,5		
	500	0,6s	2,4	0,8s	1,8	1,2s	1,4	1,6s	1,2	2,1s	1,0	2,7s	0,9	3,3s	0,8	3,9s	0,7		
	600	0,6s	3,5	0,8s	2,6	1,2s	2,1	1,6s	1,7	2,1s	1,5	2,7s	1,3	3,3s	1,2	3,9s	1,0		
	800			0,8s	4,6	1,2s	3,7	1,6s	3,1	2,1s	2,6	2,7s	2,3	3,3s	2,1	3,9s	1,8		
	1000					1,2s	5,8	1,6s	4,8	2,1s	4,1	2,7s	3,6	3,3s	3,2	3,9s	2,9		
	1200							1,6s	6,9	2,1s	5,9	2,7s	5,2	3,3s	4,6	3,9s	4,1		
	1500									2,1s	9,3	2,7s	8,1	3,3s	7,2	3,9s	6,5		

Taulukko 9. *Handbook of Finnish Plywood taulukoissa 5 ja 6 esitetyt korjauskertoimet lujuuksille ja muodonmuutoksille*

Kuormitusaika		lujuuksille ja kuormille	muodonmuutoksille	
			E (taivutus)	G (saumaleikkaus)
Pitkäaikainen	> 1 vuosi	1,00	0,7 - 0,4	0,3 -
Keskipitkä	< 1 vuosi	1,25	0,8 - 0,6	0,5 - 0,2
Lyhytaikainen	< 1 viikko	1,50	1,0 - 0,7	0,8 - 0,35
Hetkellinen	< 10 tuntia	1,75		

Taulukko 10. *Lujuuksien ja kimmomodulien korjauskerroin kosteille olosuhteille Handbook of Finnish Plywood taulukon 7. mukaan.*

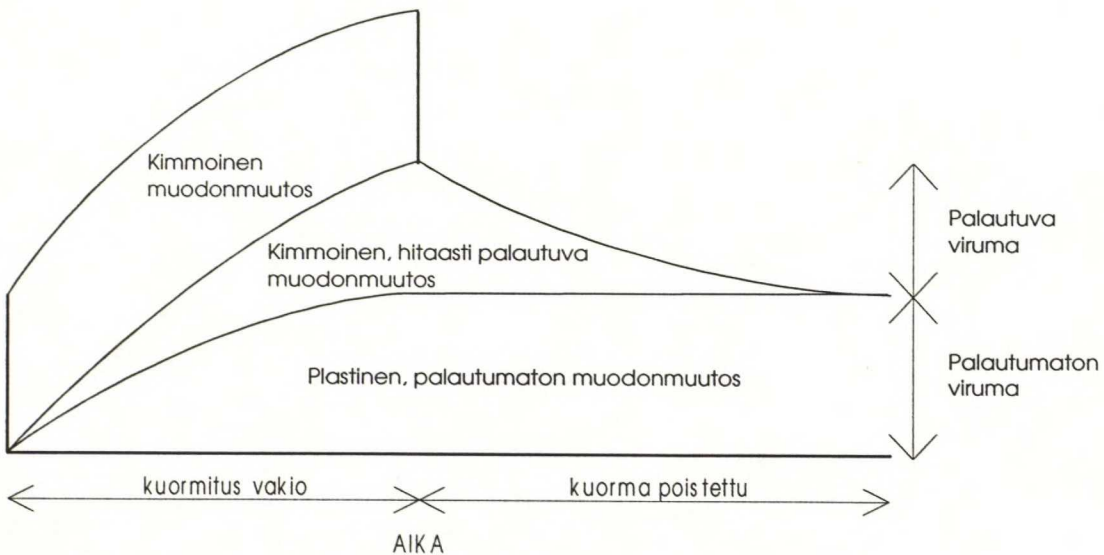
Korjauskerroin kosteus 27 %	Jännitykset	Kimmomoduli	Liukumoduli	Leimapaine pintaa vasten
Veto	0,85	0,8		
Puristus	0,6	0,8		
Taivutus	0,7	0,8		
Saumaleikkaus	0,6		0,45	
Panelileikkaus	0,7		0,6	
Leimapaine				0,7

5. PUUN JA VANERIN VIRUMINEN

5.1. YLEISTÄ

Puun käyttäytyminen pitkäaikaisessa kuormituksessa ei yleensä noudata kimmoista mallia, vaan muodonmuutokset ovat pikemminkin ajasta riippuvaisia eli puu viruu. Ajan lisäksi muodonmuutoksiin ja jännityksiin vaikuttaa käytetty puulaji, sillä eri puulajien solurakenne ja materiaaliominaisuudet ovat erilaisia. Materiaaliominaisuuksien lisäksi puun muodonmuutosten suuruuteen vaikuttaa kuormitusasuunta syynsuuntaan nähden, kuormitusaste sekä ympäristöolosuhteet kuten lämpötila ja kosteus.

Käytössä puun täytyy kestää jopa kymmeniä vuosia. Kuormitettuna puuhun kuitenkin tulee muodonmuutoksia joista osa on kimmoisia ja osa pysyviä. Pysyvät muodonmuutokset kasvavat ajan funktiona ja osa näistä muodonmuutoksista saattaa palautua kun kuormitus poistetaan. Puun yleistä käyttäytymistä kuormituksen ja ajan suhteen voidaan kuvata kuvan 13 mukaisella käyrällä.



Kuva 13. Puun muodonmuutos ajan ja kuormituksen suhteen.

Vanerin viruminen on aikaisemmissa tutkimuksissa todettu voimakkaammaksi kuin puun viruminen. Ranta-Maunus /14//15//16/ on tutkinut vanerin virumista ja kehittänyt sille matemaattista mallia. Näitä tutkimuksia ja malleja on tässä työssä tarkasteltu lyhyesti painotettuna vaihtelevan kosteuden vaikutukseen vakiokuormituksessa.

Sandwich-palkin kimmoisen käyttäytyminen voidaan jakaa kahteen osaan; taivutusmomentin ja leikkausvoimien vaikutuksiin. Näiden rasitusten ja muodonmuutosten välistä yhteyttä on käsitelty aikaisemmin ja niitä voidaan lyhyesti kuvata yhtälöillä:

$$\kappa = \frac{M}{D} \text{ ja } \gamma = \frac{Q}{S} \quad (59)$$

Staattisesti määrätyillä palkkirakenteilla taipuma voidaan vastaavasti jakaa kahteen osaan: taivutuksen ja leikkausvoiman aiheuttamaan taipumaan:

$$W = W_M + W_Q \quad (60)$$

5.2. VANERIN VIRUMINEN VAKIOKOSTEUEDESSA

5.2.1. Lineaarinen viskoelastisuus

Viskoelastisen materiaalin toiminnallinen malli voidaan kirjoittaa yhtälöllä:

$$\varepsilon(t) = \int_0^t J(t-\tau) d\sigma \quad (61)$$

missä oletetaan että alkuperäinen kuormittamaton tila kestää ajanhetkeen $t=0$. Kun nyt merkitään $\sigma(t)=0$ kun $t \leq 0$ ja $\sigma(t)=\sigma_0$ kun $t > 0$, voidaan edellinen yhtälö (61) kirjoittaa muotoon:

$$\varepsilon(t) = \sigma_0 J(t) \quad (62)$$

missä virumafunktio $J(t)$ on monotonisesti kasvava. Vanerille käyttökelpoinen virumafunktion esitystapa on esittää se eksponentiaalisessa muodossa:

$$\frac{\varepsilon(t)}{\varepsilon(0)} = EJ(t) = 1 + A_0 t + \sum_{i=1}^N A_i (1 - e^{-a_i t}) \quad (63)$$

Termi A_0 edustaa edellisessä yhtälössä palautumatonta muodonmuutosta. Palautuvaa virumaa kuvaavien termien A_i määrä saattaa joissakin tapauksissa nousta epäkäytännöllisen suureksi. Tällaisilla materiaaleilla seuraavanlainen kaksiparametrinen esitystapa on usein käyttökelpoinen:

$$\frac{\varepsilon(t)}{\varepsilon(0)} = 1 + at^b \quad (64)$$

Tätä funktiota on käytetty kuvaamaan puun ja muovien kvasistaattisia ominaisuuksia.

Lineaarisen viskoelastisuuden tapauksessa voidaan moniin palkki- ja laattaongelmiin saada ratkaisu kimmoisuuden ja viskoelastisuuden vastaavuuden periaatteella. Staattisesti määrätyn sandwich-palkin tapauksessa välitön taipuma jaettiin kahteen osaan: taivutusmomentista johtuvaan taipumaan ja leikkausrasituksista johtuvaan taipumaan. Vastaavasti voidaan pysyvän kuorman aiheuttama ajasta riippuva taipuma jakaa kahteen osaan:

$$\begin{aligned} w_M(t) &= EJ_M(t)w_M(0) \\ w_Q(t) &= GJ_Q(t)w_Q(0) \end{aligned} \quad (65)$$

5.3. VANERIN VIRUMINEN VAIHTELEVASSA KOSTEUEDESSA

Vanerin virumista tarkasteltaessa on huomattava että jäyhyysmomentti I riippuu kosteuspi-toisuudesta siten että kosteuden kasvaessa I kasvaa, koska poikkileikkauksen mitat muut-tuvat. Kosteus vaikuttaa lisäksi myös vaneriviilujen kimmokertoimiin, mutta koska tämän vaikutus taivutusjäykkyyteen on päinvastainen, pienenee jäykkyys vain vähän kosteuspi-toisuuden kasvaessa. Esimerkiksi kosteuspi-toisuuden kasvu 7 %:sta 23 %:iin pienentää koivuvanerin taivutusjäykkyyttä noin 4 % ja havuvanerin jäykkyyttä noin 2 %./14/

Ranta-Maunuksen tekemissä virumakokeissa taivutusvirumaa tutkittiin nelipistetaivutukse-na. Tällä koejärjestelyllä voitiin määrittää puhtaan taivutusviruman suuruus. Leikkausviru-man tutkimisessa käytetyt koejärjestelyt oli konstruoitu siten, että leikkausmuodon-muutosten osuus kokonaistaipumista oli mahdollisimman suuri. Kokeissa kuormitettiin yksi-aukkoista palkkia jännevälin kolmannespisteestä, jolloin koivuvanerilla alkutaipumien leik-kausmuodonmuutosten osuus oli noin 40 % ja havuvanerilla noin 85 %.

5.3.1. Koivuvanerin taivutusviruma

Jatkuva pieni kosteuden vaihtelu aiheuttaa koivuvanerille nopeamman viruman kuin suurilla muutoksilla tapahtuva, mutta muutosten välillä pitkään vakiona pysyvä kosteuden vaihtelu. Tästä syystä koivuvanerin kokonaisviruma voidaan jakaa kahteen osaan: Perinteiseen viskoelastisen mallin mukaiseen virumaan vakiokosteudessa ja lämpötilassa sekä kosteuden vaihtelusta johtuvaan virumaan.

Koivuvanerin jaksottaiset ylös- ja alaspäin tapahtuvat kosteuspi-toisuuden muutokset vaikut-tavat koivuvanerin virumaan seuraavasti: Ensimmäiset muutokset kumpaankin suuntaan li-säävät voimakkaasti virumaa. Muutaman jakson jälkeen vanerin kuivuminen aiheuttaa viru-man lisääntymisen ja kostuminen pienentää sitä. Kokonaisvirumaan syklisen vaikutus on lisäävä, sillä palautuminen on pienempää kuin kuivumisen aiheuttama viruman kasvu. /14/

5.3.2. Havuvanerin taivutusviruma

Havuvanerin käyttäytyminen vaihtelevissa kosteusolosuhteissa eroaa koivusta siten, että pelkkä kosteuden vaihtelu ei sinänsä lisää virumaa. Virumaan tulee merkittävä lisäys vain mikäli kosteuspi-toisuus kasvaa aiemmin saavutettua maksimikosteutta korkeammaksi. Tämä lisäys on selvempää korkeammilla kuormitusasteilla ($s > 0,2$).

5.3.3. Koivuvanerin leikkausviruma

Koivuvanerin leikkausviruma todettiin luonteeltaan samanlaiseksi kuin havuviilun pituus-suuntainen viruma, eli pelkällä kosteuden vaihtelulla ei ole voimakasta virumaa lisäävää vai-kutusta, vaan tärkeämpi merkitys on aikaisemman kosteusmaksimin ylittymisellä.

5.3.4. Havuvanerin leikkausviruma

Havuvanerin viruminen leikkausvoimien vaikutuksesta on samalla tavalla riippuvaista maksi-mikosteudesta kuin taivutusmomentista aiheutuva viruma. Leikkausvirumassa ei tapahdu

merkittävää välitöntä muutosta mikäli kosteuspitoisuuden muutos on alle 2 % kuormitusasteen ollessa alle 0,17. Korkealla kuormitusasteella (0,26) ja pienillä kosteuspitoisuuden muutoksilla havaitaan välitön muutos virumassa. Saman tyyppinen ilmiö esiintyy myös havuvanerin taivutuksessa.

5.4. VANERIRAKENTEEN VIRUMAN MATEMAATTINEN MALLI

Ranta-Maunus /14/ esittää vanerirakenteiden virumalle kaksi matemaattista mallia: **kumulatiivisen mallin** ja **maksimimallin**. Kaksi mallia tarvitaan koska vanerin viruma on edellä esitetyllä tavalla riippuvaista joko kosteuden vaihtelusta tai saavutetusta maksimikosteudesta. Näistä malleista siis kumulatiivinen malli sopii koivuvanerin taivutusvirumalle ja maksimimalli havuvanerin taivutukselle ja koivu- ja havuvanerin leikkausviruman arviointiin.

Tässä esityksessä virumayhtälöissä rajoitutaan tapauksiin missä kuormitus pysyy vakiona, eli kuormituksen vaihtelusta aiheutuvaa muutosta ei huomioida, eikä kuorman poistamisen jälkeistä palautumista ($\sigma(t)=\sigma(0)$).

5.4.1. Kumulatiivinen malli

Kumulatiivisessa mallissa huomioon otettavat seikat viruman lisäyksessä ovat:

- Muodonmuutos tapahtuu välittömästi kun kosteuspitoisuus muuttuu.
- Muodonmuutos on pysyvää.
- Muodonmuutos on lineaarisesti riippuvaista kuormitusasteesta.
- Muodonmuutos on lineaarisesti riippuvaista kosteuden muutoksen suuruudesta.
- Ensimmäisellä kostumisjaksolla on merkittävin vaikutus viruman lisäykseen.
- Kosteudenlisäyksen vaikutus viruman palautumiseen on pienempi kuin vastaavan suuruisen kuivumisen vaikutus viruman lisääntymiseen.

Lisäksi Ranta-Maunus esittää seuraavat seikat mitkä on otettava huomioon viruman palautumisessa mikäli kuormitus pienenee:

- Ajalla ei ole suurta merkitystä muodonmuutosten palautumiseen.
- Kun kuormitus poistetaan palautuminen tapahtuu uuden kosteusmaksimin saavuttamisen aikana ja sen jälkeen.
- Kun kosteuspitoisuus saavuttaa arvon 30 %, häviää kuormien aiheuttamat muodonmuutokset ja kappale "muistaa" alkuperäisen muotonsa.

Edellä esitetyn perusteella Ranta-Maunus esittää esittää koivuvanerin taivutusvirumalle sopivan ns. **kumulatiivisen mallin** seuraavassa muodossa:

$$d\varepsilon = K\sigma du \quad (66)$$

Tässä mallissa siis oletetaan, että muodonmuutos on lineaarisesti riippuvaa kuormitusasteesta ja kosteuspitoisuuden muutoksesta. Koska kosteuden muutoksessa sen suunta ja

aikaisempi maksimikosteus vaikuttaa muodonmuutoksen suuruuteen, on edellisen kaavan vakio K selitettävä seuraavasti:

$$\frac{K}{J(0)} = \begin{cases} a^- & \text{kun } du < 0 \\ a^+ & \text{kun } du > 0 \\ a^{++} & \text{kun } du > 0 \text{ uuden maksimikosteuden jälkeen} \end{cases} \quad (67)$$

Vanerirakenteen kokonaisvirumaa voidaan nyt arvioida vakiokosteuden ja kosteuden vaihtelun yhteisvaikutuksella. Kun kuormitusaste pysyy vakiona eli $\sigma(t)=\sigma(0)$, voidaan kosteuden vaihtelusta aiheutuva suhteellinen viruma laskea suoraan kaavasta

$$\frac{\varepsilon(t)}{\varepsilon(0)} = \int_0^t K \sigma du(\tau) \quad (68)$$

missä

$$K\sigma = \begin{cases} a^- & \text{kun } du < 0 \\ a^+ & \text{kun } du > 0 \\ a^{++} & \text{kun } du > 0 \text{ uuden maksimikosteuden jälkeen} \end{cases} \quad (69)$$

Edelleen voidaan koivuvanerin taivutuksesta aiheutuva suhteellisen viruman kokonaismäärä ajanhetkellä t kirjoittaa yhtälön (63) ja kosteuden vaihtelusta aiheutuvan viruman lisäyksen (68) avulla seuraavasti:

$$\frac{\varepsilon(t)}{\varepsilon(0)} = 1 + A_0 t + \sum_{i=1}^N A_i (1 - e^{-a_i t}) + \int_0^t K \sigma du(\tau) \quad (70)$$

Edellä olevan yhtälön vakiot koivuvanerin taivutuksen ollessa kyseessä on koottu taulukkoon 11 Ranta-Maunuksen määrittelyn mukaisesti.

Taulukko 11. Koivuvanerin kumulatiivisen mallin mukaisen taivutusviruman laskemisessa tarvittavat vakiot Ranta-Maunuksen mukaan.

Vakio	Koivuvanerin taivutus
A_0	$0,03u^2(1 + 4u^2)(\text{day})^{-1}$
A_1	$0,399 - 4,28u + 12,4u^2$
A_2	$-0,387 + 5,86u - 13,5u^2$
A_3	$1,14 - 14,9u + 56,1u^2$
a_1	$10(\text{day})^{-1}$
a_2	$0,3(\text{day})^{-1}$
a_3	$0,01(\text{day})^{-1}$
a^-	-7,40
a^+	-4,37
a^{++}	12,6

Kaavan (70) alkuosan vakio-kosteudessa tapahtuvan viruman määrittämisessä tarvittavat kertoimet A_i voidaan vaihtelevissa kosteusolosuhteissa määrittää keskimääräisen kosteuden avulla. Tämä voi olla esimerkiksi kunkin kosteuspitoisuuden kestoajalla painotettu keskiarvo.

5.4.2. Maksimimalli

Maksimimalli huomioi vanerin kosteushistorian siten että viruma ei lisäännä kosteuden vaihdella ennenkuin saavutetaan aikaisempia kosteuspitoisuuksia korkeampi kosteus. Tällöin kosteuden muutoksista aiheutuva viruman lisäys voidaan kirjoittaa muotoon:

$$\varepsilon(t) = K_0 \alpha (u_{max} - u_0) \tag{71}$$

Missä u_{max} on ajanhetkeen t mennessä saavutettu maksimikosteus
 u_0 on alkukosteus ajanhetkellä $t=0$
 K_0 voidaan määritellä seuraavasti

$$\frac{K_0}{J(0)} = b \tag{72}$$

Kappaleen suhteellisen viruman kokonaismäärä voidaan laskea kumulatiivista mallia vastaavalla tavalla kaavalla (73), missä $K_0 \sigma = b$ kun kuormitusaste pysyy vakiona.

$$\frac{\varepsilon(t)}{\varepsilon(0)} = 1 + A_0 t + \sum_{i=1}^N A_i (1 - e^{-a_i t}) + K_0 \alpha (u_{max} - u_0) \tag{73}$$

Maksimimallia voidaan käyttää havuvanerin taivutus- ja leikkausviruman sekä koivuvanerin leikkausviruman arvioimiseen. Tällöin tarvittavat vakiot saavat Ranta-Maunuksen mukaan taulukossa 12 esitetyt arvot.

Taulukko 12. Maksimimallin mukaisen viruman laskemisessa tarvittavat vakiot Ranta-Maunuksen mukaan havuvanerin taivutukselle, leikkaukselle ja koivuvanerin leikkaukselle.

Vakio	Havuvanerin taivutus	Havuvanerin leikkaus	Koivuvanerin leikkaus
A_0	$0,03u^2(1 + 4u^2)(\text{day})^{-1}$	$0,028 \cdot 3 \cdot u^2(1 + 750u^2 \text{ s}^2)(\text{day})^{-1}$	$0,028 \cdot 4 \cdot u^2(1 + 750u^2 \text{ s}^2)(\text{day})^{-1}$
A_1	$0,237 - 2,48u + 7,57u^2$	$1,4 u$	$1,5 (u + 0,04)$
A_2	$-0,331 + 4,75u - 10,2u^2$	$1,4 (u + 0,14)$	$2,2 u$
A_3	$1,07 - 13,6u + 45,8u^2$	$1,4 (u + 0,27)$	$22 (u - 0,05)$
a_1	$10(\text{day})^{-1}$	$10(\text{day})^{-1}$	$10(\text{day})^{-1}$
a_2	$0,3(\text{day})^{-1}$	$0,3(\text{day})^{-1}$	$0,3(\text{day})^{-1}$
a_3	$0,01(\text{day})^{-1}$	$0,01(\text{day})^{-1}$	$0,01(\text{day})^{-1}$
b	15	70	50...200

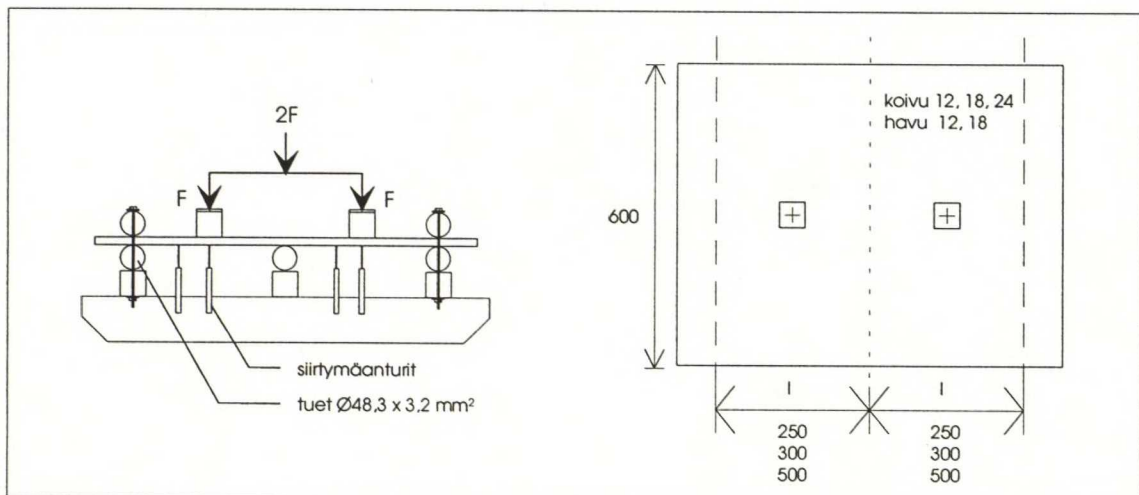
6. KOEJÄRJESTELYT

6.1. LYHYTAIKAISKOKEET

6.1.1. Koelaitteisto ja järjestelyt

Pistekuormitettujen laattojen koekappaleet kuormitettiin kaksiaukkoisina laattoina jännevälillä ollessa molemmissa aukoissa sama. Jännevälinä oli 250, 300 tai 500 mm. Kaikkien koekappaleiden leveys oli 600 mm. Päätypituutena (päätytuen ylittävä osa) oli 300 mm jännevälillä koekappaleilla 75 mm ja muilla koekappaleilla 50 mm. Tukikehikkona oli teräspuutkiprofiliista valmistetut palkit $\varnothing 48,3 \times 3,2 \text{ mm}^2$ (kuva 14). Laatan päätyjen nousu oli estetty tukeamalla laatta myös yläpuolelta saman kokoisilla teräspuutkillä kuin alapuoliset tuet. Ylätuot kiinnitettiin alatukiin pulteilla, jotka kiristettiin käsivoimin, jolloin silminhavaittavat välykset ja suurimmat laatan kieroutumat saatiin pois. Päätytuki ei siis ollut täysin jäykkä vaan salli pienen kiertymän laatalle.

Laatat kuormitettiin joko yhtäaikaaisesti molemmista, tai ainoastaan toisesta kentästästään. Kuormituspisteiden koko oli $50 \times 50 \text{ mm}^2$. Kuormituspisteen sijainti oli yleensä kenttien tai kentän keskipisteessä. Osa koekappaleista kuormitettiin toisen kentän jännevälillä neljännespisteessä keskituen vierestä. Kuormituskoneen voima välitettiin kuormituspisteeseen $50 \times 50 \times 50 \text{ mm}^3$ kertopuupalikan ja teräslevyn avulla.



Kuva 14. Kaaviokuva kuormitusjärjestelyistä.

Koelaitteistona käytettiin Roell&Koerthous kuormituskonetta jonka maksimikuorma on 200 kN. Konetta voidaan ohjata manuaalisesti joko voima- tai siirtymäohjauksena. Voimaohjauksessa säädetään voiman kasvatusnopeus (kN/min) ja siirtymäohjauksessa kuormituspisteen siirtymänopeus (mm/min). Näissä kokeissa käytettiin siirtymäohjausta ja pyrittiin murtoon n. 3-6 min kuormitusajalla. Tällöin kuormitusnopeudeksi tuli 2-3,5 mm/min.

Koelattojen taipumia mitattiin induktiivisilla siirtymäantureilla joiden nimellispituus oli 20 mm tai 40 mm. Siirtymäantureiden mittaustarkkuus on 0,20 % ja 0,40 %. Anturit oli mah-

dollisuuksien mukaan sijoitettu laatan alapuolelle. Laatan keskituen kohdalla siirtymäanturit sijoitettiin laatan yläpuolelle. Kuormitusvoima ja voimaa vastaavat siirtymät kussakin mitauspisteessä tallennettiin mikrotietokoneelle. Näistä tiedoista piirrettiin voima/siirtymäkuvaajat.

6.1.2. Koekappaleet

Lyhytaikaiskoekappaleet valmistettiin koivu- ja havuvanerista. Vanerityyppejä oli yhteensä seitsemän. Koivuvaneri oli tasapaksuista viiluista normaalisti ristiinliimattua. Viilujen paksuus oli 1,4 mm tai 1,1 mm. 1,1 mm viilut koivuvanerin sisäviiluina poikkeavat normaalista tuotanto-ohjelmasta, joten se voidaan katsoa erikoisvaneriksi. Havuvanerikoekappaleet valmistettiin 1,4 mm ja 2,5 mm paksuista viiluista liimatuista ns. paksuviiluisista vanereista. Kokeessa oli mukana myös normaalista poikkeava sekavaneri, jonka kaikki poikittaiset viilut olivat koivua ja pituussuuntaiset havua. Vanerien paksuudet vaihtelivat välillä 12-24 mm. Vanerityypit on esitetty taulukossa 13 ja niiden teoreettisia ja eri lähteiden mukaisia kimmoarvoja on esitetty liitteessä 1.

Taulukko 13. Lyhytaikaiskokeissa käytetyt vanerityypit.

tyyppi	tunnus	vanerilaji ja nimellispaksuus	viilujen lkm	vanerin rakenne
1.	K12	Koivu 12 mm	11	abababababa
2.	K18	Koivu 18 mm	13	ABABABABABABA
3.	K24	Koivu 24 mm	21	ababababababababababa
4.	H12	Havu 12 mm	7	CDIDIDC
5.	H18	Havu 18 mm	9	CJCJIJCJC
6.	B12	Koivu 12 mm	9	ABABABABA
7.	C18	Seka 18 mm	13	CBCBCBCBCBCBC
viilupaksuudet ja viilumateriaalit			a	1,1 mm koivuviilu, syyn suunta pintaviilun suuntaan
			b	1,1 mm koivuviilu, syynsuunta kohtisuoraan pintaviilun suuntaan
			A	1,4 mm koivuviilu, syyn suunta pintaviilun suuntaan
			B	1,4 mm koivuviilu, syynsuunta kohtisuoraan pintaviilun suuntaan
			C	1,4 mm havuviilu, syyn suunta pintaviilun suuntaan
			D	1,4 mm havuviilu, syyn suunta kohtisuoraan pintaviilun suuntaan
			I	2,5 mm havuviilu, syyn suunta pintaviilun suuntaan
			J	2,5 mm havuviilu, syyn suunta kohtisuoraan pintaviilun suuntaan

6.1.3. Koekappaleiden säilytys ja ilmastointi

Koekappaleita säilytettiin ennen koekuormitusta Teknillisen korkeakoulun talonrakennus-tekniikan laboratorion säähuoneessa R023. Tavoitteena oli tasaannuttaa koekappaleet kahdessa eri suhteellisessa kosteudessa, 75 % ja 95 %. Matalampi suhteellinen kosteus pysyi melko hyvin tasaisena koko säilytysajan. Sään muutoksen yhteydessä tehdyn hydrografin kalibroinnin perusteella todettiin, että kosteus jäi tavoitetta alhaisemmaksi eli noin 70 %:iin. Korkeammassa suhteellisessa kosteudessa vaihtelut olivat melko voimakkaita ja keskimääräinen kosteus jäi välille 90-95%.

Kappaleita säilytettiin säähuoneessa noin neljän viikon ajan ennen ensimmäisiä koekuormituksia. Tässä ajassa havuvanerista valmistettujen koekappaleiden kosteuspitoisuus asettui noin 11,0 p-%:iin ja koivuvanerista valmistettujen koekappaleiden noin 10,7 p-%:iin. Kuivempien koekappaleiden koestamisen jälkeen säähuoneen ilman suhteellinen kosteus nostettiin 95 %:iin, missä koekappaleita säilytettiin noin seitsemän viikkoa. Näissä olosuhteissa

havuvaneristen koekappaleiden kosteuspitoisuudet asettuivat noin 21,9 p-%:iin ja koivu-
vanerista valmistettujen kosteudet noin 22,9 p-%:iin. Keväällä 1995 tehtiin täydentävä koesar-
ja ja nämä koekappaleet tasaannutettiin ilman suhteellisessa kosteudessa RH 75 %. Näiden
kappaleiden keskimääräiset tasapainokosteudet olivat havuvanerilla 12,7 %, koivu-
vanerilla 11,7 % ja sekavanerilla 12,0 %.

6.1.4. Koekappaleiden määrät ja mitat

Koekappaleita oli yhteensä 84 kpl siten, että kustakin vanerityypistä, kuormitustapauksesta
ja kosteuspitoisuudesta oli kolme rinnakkaiskoekappaletta. Kappaleista kuormitettiin 54 kpl
kuivemmassa ilmassa tasutettuina, joten kaikille kuormitustapauksille ei tehty kuormitusta
molemmissa kosteuspitoisuudessa. Koekappaleiden tunnuks, mitat, kuormitustapa ja
säilytyskosteus ennen kuormitusta on esitetty taulukoissa 14 ja 15.

Taulukko 14. Kuivempien koekappaleiden tunnuks, mitat ja kuormitustapaukset.

koekappaleen tunnus k=1-3	vanerila	vanerityyppi (taulukko13)	nimellis- paksuus mm	tukiväli mm	päätypituus mm	kuormitus- tapa *	säilytys- kosteus ** %
K18L2K2k	koivu	2	18	250	50	2K	70
H18L2K2k	havu	5	18	250	50	2K	70
K12L3K2k	koivu	1	12	300	75	2K	70
H12L3K2k	havu	4	12	300	75	2K	70
K24L3K2k	koivu	3	24	300	75	2K	70
K24L5K2k	koivu	3	24	500	50	2K	70
K24L3K4k	koivu	3	24	300	75	¼K	70
K24L5K4k	koivu	3	24	500	50	¼K	70
K18L2K1k	koivu	2	18	250	50	1K	70
H18L2K1k	havu	5	18	250	50	1K	70
K24L3K1k	koivu	3	24	300	75	1K	70
K24L5K1k	koivu	3	24	500	50	1K	70
B12L2K2k	koivu	6	12	250	50	2K	75
H12L2K2k	havu	4	12	250	50	2K	75
C18L2K2k	seka	7	18	250	50	2K	75
B12L3K2k	koivu	6	12	300	75	2K	75
K18L3K2k	koivu	2	18	300	75	2K	75
C18L3K2k	seka	7	18	300	75	2K	75

* 2K=molempien kenttien keskellä, 1K=toisen kentän keskellä, ¼K=toisen kentän jännevälin ¼-pisteessä keskituen vieressä.

** Ilman suhteellinen kosteus kuormitusta edeltävässä säilytyksessä

Taulukko 15. Kosteampien koekappaleiden tunnuks, mitat ja kuormitustapaukset.

koekappaleen tunnus m=4-6	vanerila	vanerityyppi (taulukko 13)	nimellis- paksuus mm	tukiväli mm	päätypituus mm	kuormitus- tapa *	säilytys- kosteus ** %
K18L2K2m	koivu	2	18	250	50	2K	95
H18L2K2m	havu	5	18	250	50	2K	95
K12L3K2m	koivu	1	12	300	75	2K	95
H12L3K2m	havu	4	12	300	75	2K	95
K24L3K2m	koivu	3	24	300	75	2K	95
K24L5K2m	koivu	3	24	500	50	2K	95
K18L2K1m	koivu	2	18	250	50	1K	95
H18L2K1m	havu	5	18	250	50	1K	95
K24L3K1m	koivu	3	24	300	75	1K	95
K24L5K1m	koivu	3	24	500	50	1K	95

* 2K=molempien kenttien keskellä, 1K=toisen kentän keskellä, ¼K=toisen kentän jännevälin ¼-pisteessä keskituen vieressä.

** Ilman suhteellinen kosteus kuormitusta edeltävässä säilytyksessä

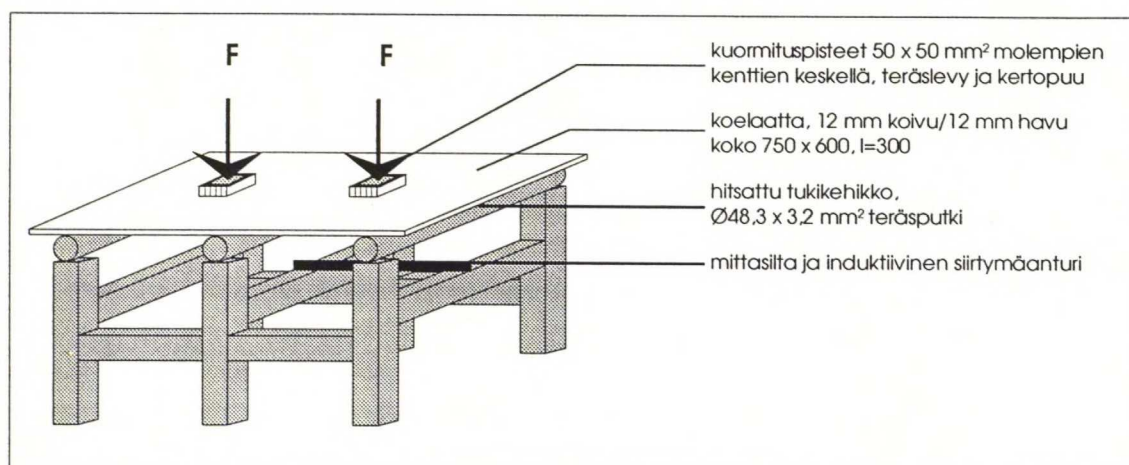
6.2. PITKÄAIKAISKOKEET

6.2.1. Koelaitteisto ja järjestelyt

Pitkäaikaiskokeet tehtiin sekä pistekuormitetuilla laatoilla, että kaksitukisena kahdesta pisteestä kuormitetuilla palkeilla (4-pistetaivutus). Kokeet tehtiin vaihtuvissa kosteusolosuhteissa kuormituksen pysyessä vakiona. Koejärjestelyt rakennettiin Teknillisen korkeakoulun talonrakennustekniikan säähuoneeseen R007, missä huoneen lämpötilaa ja suhteellista kosteutta voidaan pitää halutulla tasolla ATE-UNIVERSAL 215 ilmalauhduttimella. Laitteistossa ilma suodatetaan ja tarvittaessa jäähdytetään, kuivataan, lämmitetään ja kostutetaan automaattisesti. Haluttu ilmantila säädetään lämpötila- ja kosteussäätimellä, jonka tuntoelimet sijaitsevat paluuilman kanavassa. Ilma jäähdytetään ja kuivatetaan kylmäkoneella ja sisään puhallettava ilma lämmitetään tarvittaessa sähkövastuksella.

Säähuoneen suhteellista kosteutta vaihdeltiin välillä 45 %-92 %. Kosteuden ja lämpötilan muutoksia seurattiin hydrografilla, sekä sähköisillä lämpötilan ja suhteellisen kosteuden mittareilla, joiden mittaustulokset tallennettiin Squirell-loggerilla 30 lukeman keskiarvoina puolen tunnin välein.

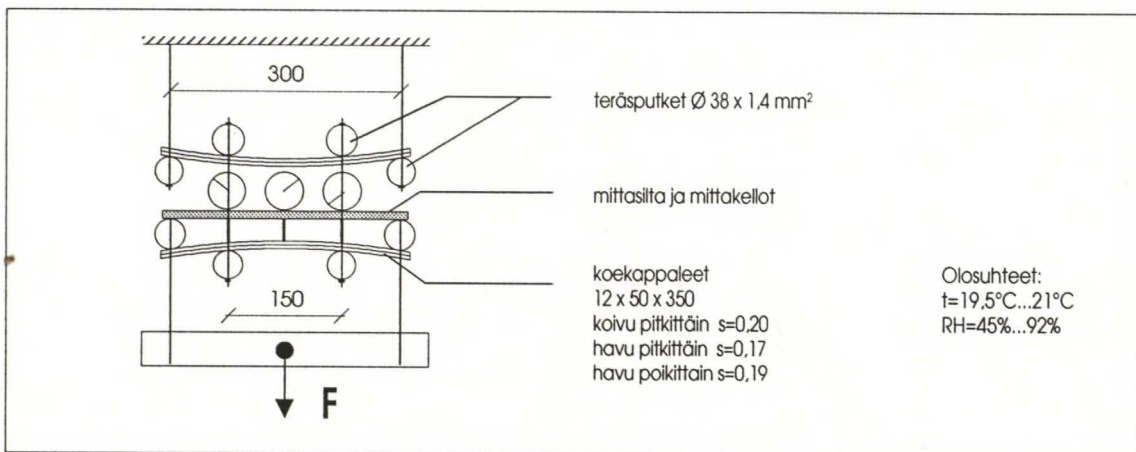
Laattojen virumakoetta varten valmistettiin teräsprofiilista $\varnothing 48,3 \times 3,2 \text{ mm}^2$ kehyköt, joiden päälle koelaatat asetettiin vapaasti tuettuina. Laatat kuormitettiin pistekuormitettuna kaksiaukkoisina laattoina jännevälillä ollessa 300+300 mm (kuva 15) ja pintaviilun syyn suunta jännevälillä suuntaan. Kuormituspisteinä oli molempien kenttien keskipisteissä $50 \times 50 \text{ mm}^2$ kertopuupalikat ja kuormitusaste molemmissa kentissä oli sama. Koivuvanerin kuorma oli 1030 N eli kuormitusasteena oli 10,9 % lyhytaikaiskokeiden keskimääräisestä murto-kuormasta. Havuvanerin kuorma oli 530 N eli kuormitusaste 11,5 %. Handbook of Finnish Plywoodin sallimista arvoista nämä olivat koivuvanerilla 69 % ja havuvanerilla 66 % (pitkäaikaislujuus, ilman taipumarajoitusta). Laattojen virumista seurattiin mittaamalla keskipisteen taipumaa lattateräkseen kiinnitetyllä digitaalisella Mitutoyo-mittakellolla. Mittausjärjestelyn tarkkuudeksi voidaan arvioida noin $\pm 0,03 \text{ mm}$ mittausta kohden.



Kuva 15. Pistekuormitettujen vanerilaattojen virumakokeen koejärjestelyt

4-pistetaivutuskokeessa rinnakkaiskoekappaleet tuettiin sarjaan $\text{Ø}38 \times 1,4 \text{ mm}^2$ teräsputkien varaan, (kuva 16). Kappaleet kuormitettiin jännevälillä neljännespisteistä kuormalla $F/2$, jolloin kuormituspisteiden välillä oli vakio taivutusmomentti $F \cdot l/8$. Koekappaleista koivu kuormitettiin pintaviilun suhteen pituussuunnassa ja havuvanerit sekä pituus- että poikkisuunnassa. Rinnakkaiskoekappaleiden keskimääräinen kuorma F oli koivuvaneri-kappaleilla 439 N, pitkittäin kuormitettulla havulla 254 N ja poikittain kuormitettulla havulla 134 N. Lyhytaikaisista murtokuormista nämä vastasivat koivulla n. 19 %, pitkittäin kuormitettulla havulla n. 19 % ja poikittain kuormitettulla havulla n. 17 %. Rinnakkaiskoekappaleiden kuormat poikkesivat hieman toisistaan, mikä johtui koejärjestelyistä. Lyhytaikaiskuormitusten vertailuarvot saatiin J. Rekosen et al. tekemistä kokeista (koekappaleet leikattu samoista levyistä).

Koekappaleiden taipumat päätytukien suhteen mitattiin kolmella mittakellolla, jotka oli kiinnitetty alumiiniseen mittasillan. Yksittäisen mittauksen tarkkuus koejärjestelyt huomioon ottaen oli arviolta n. $\pm 0,05 \text{ mm}$. Epätarkkuutta lukemiin tuli mm. mittasillan sivusuuntaisesta sijainnista ja koekappaleen taipumisesta ja kiertymisestä aiheutuvasta tukien liikkumisesta.



Kuva 16. 4-pistetaivutus, virumakokeiden koejärjestelyt

6.2.2. Koekappaleiden vanerityypit ja määrät

Vanerilaattojen virumakokeessa koekappaleina oli 12 mm:n havu- ja koivuvaneria. Koivuvaneri oli tyyppiä 1 eli tasapaksuista 1,1 mm:n viiluista liimattua 12 mm vaneria. Havuvanerikoekappaleet valmistettiin vanerityypistä 4 eli vanerin rakenne oli CDIDIDC. Laattojen koko oli $750 \times 600 \text{ mm}^2$ eli jännevälillä oli $300+300 \text{ mm}$ ja päätypituutena 75 mm. Kummas-takin vanerityypistä oli kaksi rinnakkaiskoekappaletta eli laattakoekappaleita oli yhteensä neljä. Lisäksi samassa huoneessa säilytettiin molemmista vanerityypeistä kahta vertailukappaletta joiden avulla seurattiin kosteuspitoisuuden ja tämän muutosten aiheuttamia muodonmuutoksia. Vertailukappaleiden muodonmuutoksia mitattiin demec-mittarilla sekä pintaviilun pituus- että poikkisuuntaan.

4-pistetaivutuksessa kuormitettiin kappaleita joiden koko oli 50×350 mm³, eli jänneväli 300 mm ja päätypituus 25 mm. Kuormituspisteet sijaitsivat tulta lukien jännevalin ensimmäisissä neljännespisteissä. Vanerityypit olivat samoja kuin laattojen virumakokeissa. Havuvanerista valmistetut koekappaleet kuormitettiin pintaviilun suhteen sekä pituus- että poikkisuunnassa. Koivuvanerikoekappaleet kuormitettiin ainoastaan pituus suunnassa. Rinnakkaiskoekappaleita oli kaksi eli koekappaleita oli yhteensä kuusi. Lisäksi kustakin tapauksesta oli vertailukoekappaleet kosteuspitoisuuden ja kosteusmuodonmuutosten seuraamista varten..

Kaikkien koekappaleiden reunat oli käsitelty silikonilla ennen kokeen alkua, jotta reunojen kautta tapahtuvaa kosteuden siirtymistä ei tapahtuisi. Koekappaleiden tunnuksat, mitat ja kuormat on esitetty taulukossa 16.

Taulukko 16. Virumakoekappaleiden kuormitukset ja mitat kokeen alussa.

	vaneri-laji	vanerin tyyppi	paksuus mm	leveys mm	pituus mm	kuorm. suunta/ tapa	kuorm. * aste %	kuorma N
LAATAT:								
VIRK1	koivu 12	1	12,03	600	750	piste- kuorma	10,9	1030
VIRK2	koivu 12	1	12,09	600	750	molempien	10,9	1030
VIRH1	havu 12	4	11,81	600	750	kenttien	11,5	530
VIRH2	havu 12	4	11,82	600	750	keskellä	11,5	530
4-PISTE:								
K1	koivu 12	1	11,87	49,45	350	¼-pisteissä pit.	19,9	444
K2	koivu 12	1	11,97	49,98	350	pit.	19,4	433
H1	havu 12	4	11,57	49,68	350	pit.	17,2	259
H2	havu 12	4	11,67	49,80	350	pit.	16,4	248
HP1	havu 12	4	11,55	49,70	350	poik.	20,0	140
HP2	havu 12	4	11,57	49,88	350	poik.	18,4	129

* kuormitusaste lyhytaikaiskokeista, Kiira E. laatat, Rekonen J. 4-pistetaivutus

7. KOKEIDEN TULOKSET

7.1. LYHYTAIKAISKOKEIDEN TULOKSET

7.1.1. Pistekuormitetut laatat

Lyhytaikaiskokeissa koekappaleissa havaittava murtumistapa oli lähes kaikissa tapauksissa kolmivaiheinen. Ensimmäinen selvä murtuminen tapahtui yleensä kuormituspisteen kohdalla laatan pituussuuntaisen taivutusmomentin aiheuttamana ulomman viulun murtumisena. Kuormituksen edelleen kasvaessa toiseksi ulommainen viilu murtui taivutuksesta. Ensimmäinen ja toinen vaihe saattoivat tapahtua myös lähes yhtäaikaisena ristimurtona. Kolmas selvä vaihe molemmista kentistä kuormitetuissa laatoissa oli tuella tapahtuva taivutusmurto sen jälkeen kun molemmat kentät olivat murtuneet. 18 mm havuvanerilla 250 mm:n jännävälillä lopullinen murtuminen tapahtui laatan lävistymisenä. Osassa koekappaleissa ensimmäinen murto oli havaittavissa keskituen kohdalla.

Murtokuormat ja niitä vastaavat taipumat on määritetty etsimällä voima/taipumakuvaajien avulla koelaitteiston tallentamista voima/taipuma -pareista murtohetkeä vastaavat pisteet. Koekappaleiden kuormituspisteiden voima-taipumakuvaajat on esitetty kuvissa 17a...17e. Kuviin on merkitty kunkin koekappaleen kuormituspisteen taipuman lisäksi myös ne A- ja B-kentän murtopisteet, jotka pystyttiin selvästi määrittelemään. Kuvissa on myös keskimääräisestä murtokuormasta lasketut $0,1 \cdot F_{\text{murto}}$, $0,3 \cdot F_{\text{murto}}$, $0,4 \cdot F_{\text{murto}}$, $0,6 \cdot F_{\text{murto}}$ ja $0,8 \cdot F_{\text{murto}}$ ja näitä pisteitä vastaavat keskimääräiset taipumat.

Rinnakkaiskoekappaleista määritetyt keskimääräiset kosteudet, tiheydet, paksuudet ja murtokuormat sekä 1 kN:n kuormaa vastaava taipuma on koottu taulukoihin 17-19. Laattojen keskimääräinen murtokuorma on laskettu koekappaleista ainoastaan ensimmäisenä havaituista murroista, sillä ensimmäisen murron jälkeen laatan staattinen systeemi muuttuu eikä siinä tapauksessa olisi tarkoituksenmukaista ottaa molempien kenttien murtokuormaa laskennassa huomioon. Lisäksi ensimmäisen murron jälkeen kuormitustaso laski ja jälkimmäisen kentän murto joissakin tapauksissa tapahtui alhaisemmalla kuormalla kuin ensimmäinen murto. Tämän jälkeen kuorma edelleen kasvoi lopulliseen murtoon asti. Koska keskimääräistä murtokuormaa vastaavia taipumia ei voida määrittää, on taulukkkoon lisäksi laskettu 80 % keskimääräisestä murtokuormasta ja tätä kuormaa vastaava keskimääräinen taipuma. Yksittäisten koekappaleiden ominaisuudet sekä keskiarvon laskennassa huomioon otetut pisteet on esitetty liitteessä 2 ja anturien sijainti sekä täydelliset voima/taipumakuvaajat liitteessä 3.

Koekappaleiden kosteuspitoisuus määritettiin lämpökaappimenetelmällä sahaamalla koekappaleista kaksi n. 30-80 g:n painoista näytettä mahdollisimman pian kuormituksen jälkeen. Kappaleiden kosteuspitoisuudet määritettiin kaavaa (73) käyttäen. Koska koekappaleiden kosteus määritettiin kuormituskokeen jälkeen, koekappaleet pääsivät jonkin verran kuivumaan ennen kosteuden määrittämistä. Kuivumisen minimoimiseksi koelaattoja pidettiin odotusajoina muovikalvon alla, mutta tästä huolimatta koekappaleiden todellinen kosteus kuormitushetkellä oli jonkin verran suurempi kuin taulukossa olevat mitatut arvot. Kuivem-

milla koekappaleilla kuormitushetken kosteuspitoisuus koekappaleen paksuudesta riippuen oli arviolta noin 0,2-0,4 %-yksikköä suurempi kuin taulukossa olevat arvot ja kosteammilla koekappaleilla arviolta 0,3-0,5 %-yksikköä suurempi. Vastaavasti taulukkoon lasketut tiheydet ovat kuormitushetken tiheyttä pienemmät. Kosteuspitoisuuden määrittelemiseen käytetyn lämpökaappimenetelmän (105 °C, n. 1,5-2 vrk) tarkkuus on noin -0,7...+1,5 prosenttiyksikköä /9/.

Koekappaleen kosteuspitoisuus:

$$u = \frac{100(m_u - m_0)}{m_0} \quad (\%) \quad (74)$$

missä

u	=	kosteus
m_u	=	massa kosteana
m_0	=	massa kuivana

Koekappaleiden tiheys määritettiin kosteusnäytteistä ennen kuivatusta mittaamalla kosteusnäytteiden päämitat työntömitalla ja laskemalla tiheys kaavalla (75).

$$\rho = \frac{m_u}{V_u} \quad (75)$$

jossa

ρ	=	tiheys kosteana
m_u	=	massa kosteana
V_u	=	tilavuus kosteana

Kosteusnäytteiden sahauksen yhteydessä koelaatat sahattiin halki, jolloin sisäviilujen mahdollisia leikkausmuodonmuutoksia voitiin arvioida silmämääräisesti. Koska laatat kuormitettiin lopulliseen murtoon asti sisäviiluissa havaittavien rolling shear –leikkausmuodonmuutosten syntymishetkeä on vaikea päätellä tämän koesarjan puitteissa. Näiden leikkausmuodonmuutosten selvittäminen vaatisi koesarjat eri kuormitusasteilla jolloin leikkausmurtojen syntymishetki voitaisiin määritellä.

Rinnakkaiskoekappaleista määritettiin kunkin kuormitustapauksen keskimääräisen murto-kuorman lisäksi myös $0,1 \cdot F_{\text{murto}}$, $0,3 \cdot F_{\text{murto}}$, $0,4 \cdot F_{\text{murto}}$, $0,6 \cdot F_{\text{murto}}$ ja $0,8 \cdot F_{\text{murto}}$, sekä näitä vastaavat keskimääräiset taipumat. Pisteiden $0,1 \cdot F_{\text{murto}}$ ja $0,3 \cdot F_{\text{murto}}$ avulla laskettiin voima/taipuma -kuvaajan sekantin kulmakerroin eli 1 kN:n kuormaa vastaava taipuma. Tätä arvoa verrattiin NISA-laskennassa saatuihin tuloksiin. Alempi edellä mainituista pisteistä valittiin siksi, että voimaan $0,1 \cdot F_{\text{murto}}$ mennessä koelaatassa olleet kieroutumat ja löysyydet oli saatu pois. Piste $0,3 \cdot F_{\text{murto}}$ valittiin siksi, että tämän pisteen jälkeen joissakin tapauksissa – esim. K18L2K2m ja K24L3K2m – kuvaajassa on havaittavissa taite missä kulmakerroin pienenee, eli taipuma/1kN kasvaa. On mahdollista, että tässä pisteessä poikittaisten viilujen rolling-leikkauslujuus ylittyy, jolloin poikkiviilut menettävät kokonaan vähäisen lujuutensa ja laatoissa tapahtuu äkillistä taipumaa. Kuvaaja on kuitenkin tämän jälkeen lähes lineaarinen lopulliseen murtoon asti koekappaleen pintaviiluissa tapahtuneita säröilyjä lukuunottamatta.

Taulukko 17. RH 70 %:ssa säilytettyjen koekappaleiden keskimääräiset ominaisuudet.

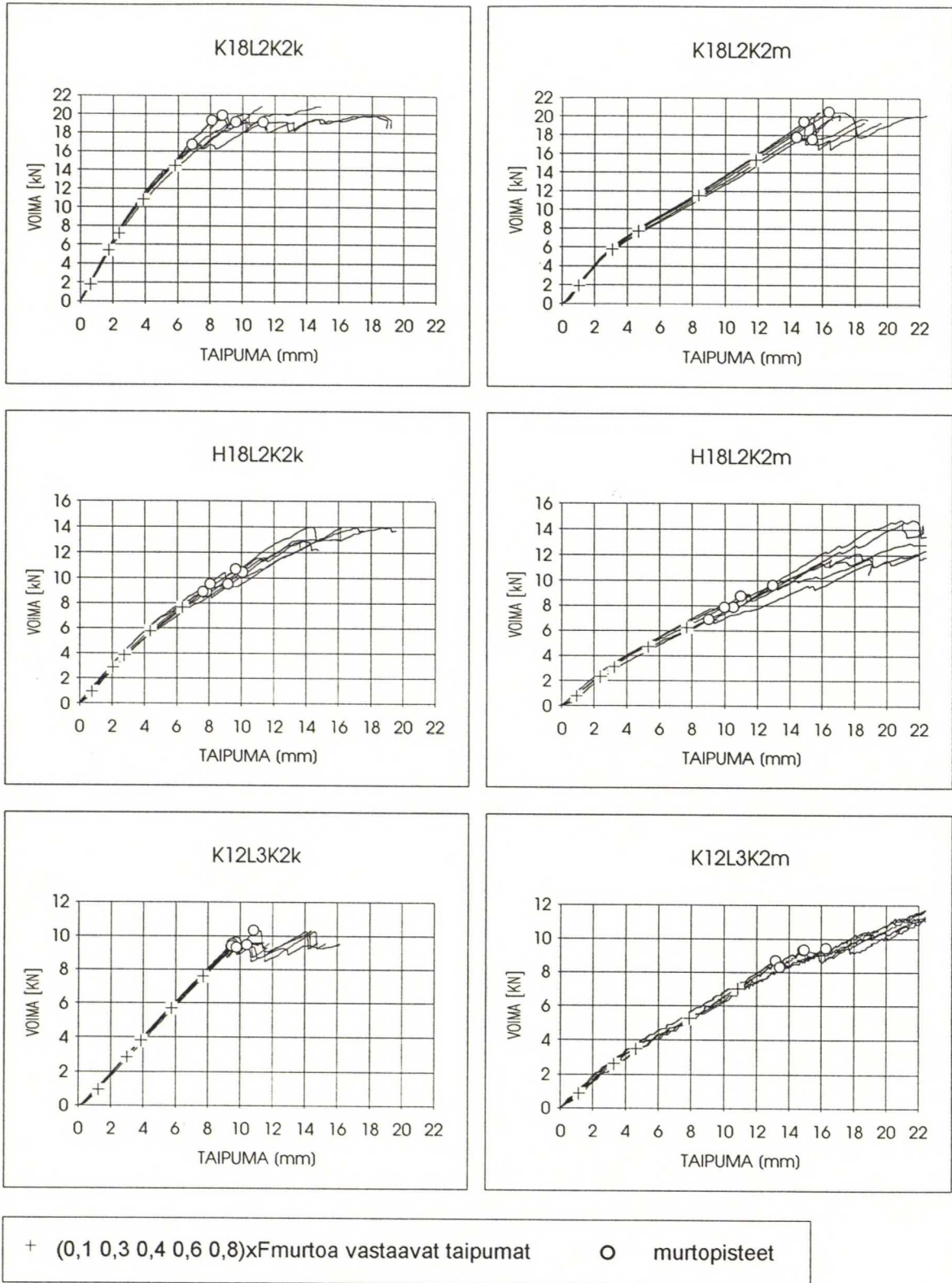
RH 70 %	kosteus	tiheys	paksuus	F-murto	F-murto keskihaj	F-murto keskihaj	w-murto	w/1kN 0,1...0,3	0,8xFm	w-08 keskim
	%	kg/m3	mm	kN	kN	%	mm	mm/kN	kN	mm
K18L2K2k	10,6	681,9	17,71	18,1	1,3	7,3	7,8	0,318	14,5	5,8
H18L2K2k	10,3	501,0	17,74	9,6	0,8	8,3	8,8	0,670	7,7	5,7
K12L3K2k	10,8	724,3	12,09	9,5	0,1	1,0	9,6	0,931	7,6	7,7
H12L3K2k	12,2	499,8	11,99	4,6	0,4	9,4	7,6	1,514	3,7	6,2
K24L3K2k	11,0	707,7	23,42	25,3	0,2	0,9	8,1	0,224	20,2	5,8
K24L5K2k	11,0	728,1	23,20	21,1	1,4	6,8	12,1	0,483	16,9	9,1
K24L3K4k	10,4	714,0	23,31	30,9	2,9	9,4	9,4	0,183	24,7	6,7
K24L5K4k	10,5	709,9	23,10	24,1	1,5	6,1	11,7	0,359	19,3	8,4
K18L2K1k	10,5	692,4	17,64	17,2	3,1	18,0	8,1	0,353	13,8	6,3
H18L2K1k	10,5	496,2	17,95	13,3	3,2	24,1	13,4	0,676	10,7	10,5
K24L3K1k	10,4	698,5	23,49	24,0	1,0	4,1	8,6	0,253	19,2	5,9
K24L5K1k	10,8	724,9	23,23	18,8	1,7	9,3	12,6	0,569	15,1	9,5
koivu	10,7	709,1				7,0				
havu	11,0	499,0				13,9				
kaikki	10,8					8,7				

Taulukko 18. RH 90 %:ssa säilytettyjen koekappaleiden keskimääräiset ominaisuudet.

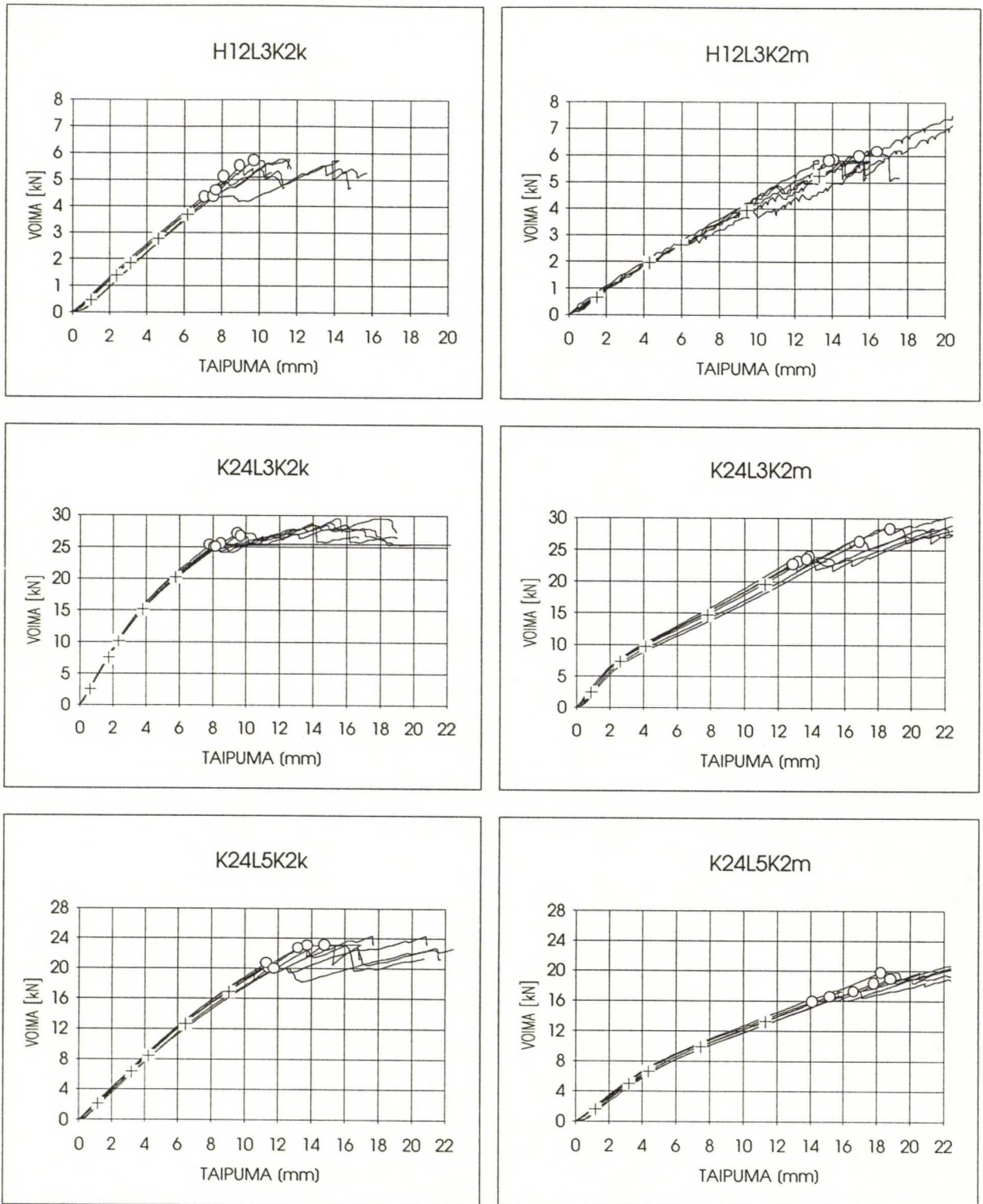
RH 90 %	kosteus	tiheys	paksuus	F-murto	F-murto keskihaj	F-murto keskihaj	w-murto	w/1kN 0,1...0,3	0,8xFm	w-08 keskim
	%	kg/m3	mm	kN	kN	%	mm	mm/kN	kN	mm
K18L2K2m	23,8	747,7	18,67	19,2	1,4	7,2	15,2	0,533	15,4	11,9
H18L2K2m	21,6	526,4	18,42	7,8	1,0	12,2	10,2	0,933	6,2	7,7
K12L3K2m	25,9	783,4	12,76	8,8	0,5	6,0	13,9	1,220	7,0	10,9
H12L3K2m	22,3	527,0	12,35	6,6	1,1	16,9	17,3	2,153	5,2	13,3
K24L3K2m	22,3	765,7	24,41	24,5	1,7	7,1	14,7	0,363	19,6	11,2
K24L5K2m	22,1	762,5	24,29	16,6	0,7	4,0	15,3	0,604	13,3	11,3
K18L2K1m	23,2	739,8	18,57	15,7	1,5	9,8	13,7	0,593	12,6	10,9
H18L2K1m	21,9	549,9	18,55	12,6	2,9	22,7	16,0	1,142	10,1	12,9
K24L3K1m	20,2	736,6	24,42	23,1	2,9	12,5	14,5	0,385	18,5	11,2
K24L5K1m	22,6	777,3	24,16	17,6	2,1	12,0	17,4	0,713	14,1	13,3
koivu	22,9	759,0				8,4				
havu	21,9	534,4				17,3				
kaikki	22,6					11,0				

Taulukko 19. RH 75 %:ssa säilytettyjen koekappaleiden keskimääräiset ominaisuudet.

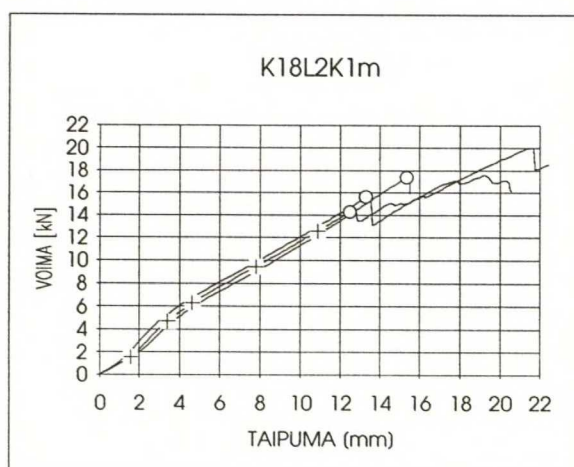
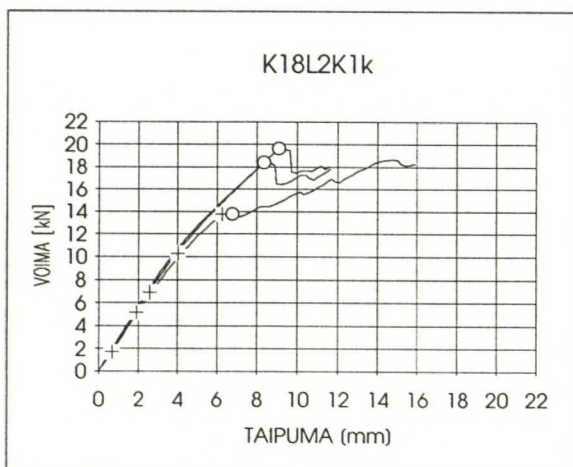
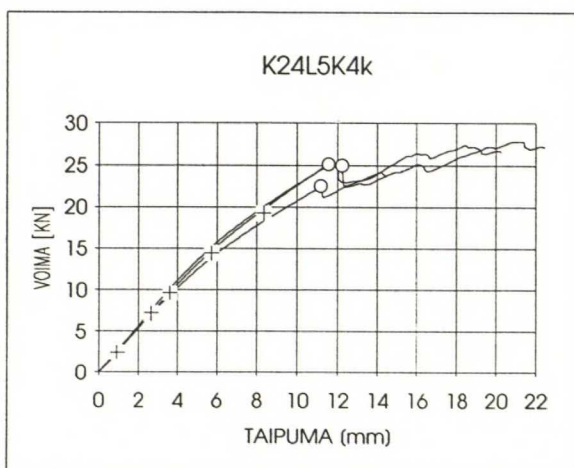
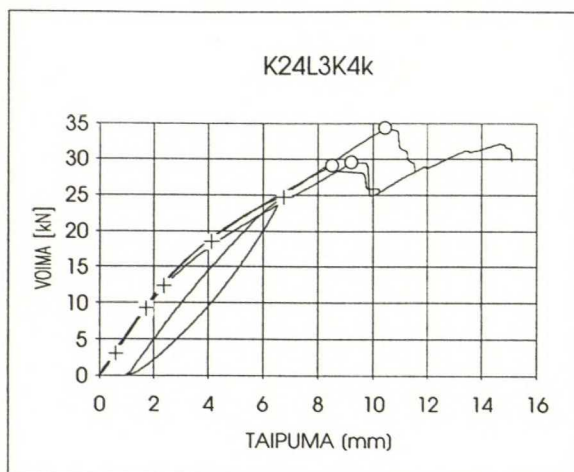
RH 75 %	kosteus	tiheys	paksuus	F-murto	F-murto keskihaj	F-murto keskihaj	w-murto	w/1kN 0,1...0,3	0,8xFm	w-08 keskim
	%	kg/m3	mm	kN	kN	%	mm	mm/kN	kN	mm
B12L2K2k	11,5	728,2	12,06	12,8	0,8	6,6	10,5	0,639	10,2	7,7
H12L2K2k	12,7	525,5	11,56	5,1	0,4	8,4	7,9	1,316	4,1	6,0
C18L2K2k	12,1	583,5	17,99	10,2	1,1	10,7	5,5	0,403	8,2	3,9
B12L3K2k	11,4	711,3	12,07	11,9	0,8	6,5	11,7	0,863	9,5	8,9
K18L3K2k	12,1	713,8	17,75	18,7	0,5	2,9	10,6	0,408	15,0	7,4
C18L3K2k	11,9	581,1	17,98	10,0	0,6	6,0	6,7	0,526	8,0	4,9
koivu	11,7	717,8				5,3				
havu	12,7	525,5				8,4				
seka	12,0	582,3				8,3				
kaikki	12,0					6,8				



Kuva 17a. Lyhytaikaiskoekappaleiden kuormituspisteiden voima-taipumakuvaajat, murtopisteet ja keskimääräisistä murtokuormista lasketut 0,1; 0,3; 0,4; 0,6 ja 0,8 \times F_{murtoa} vastaavat keskimääräiset taipumat.

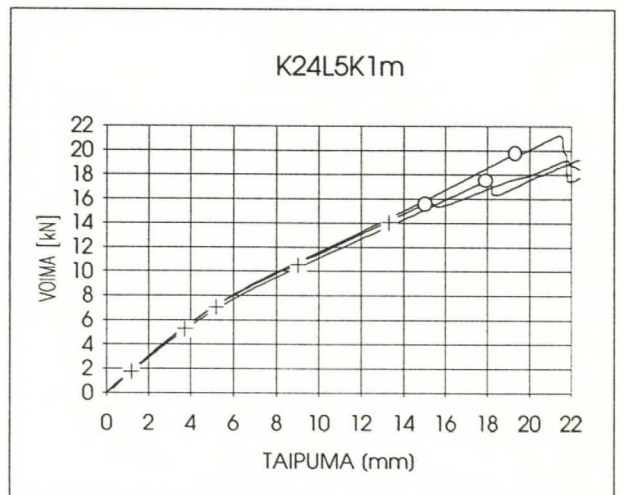
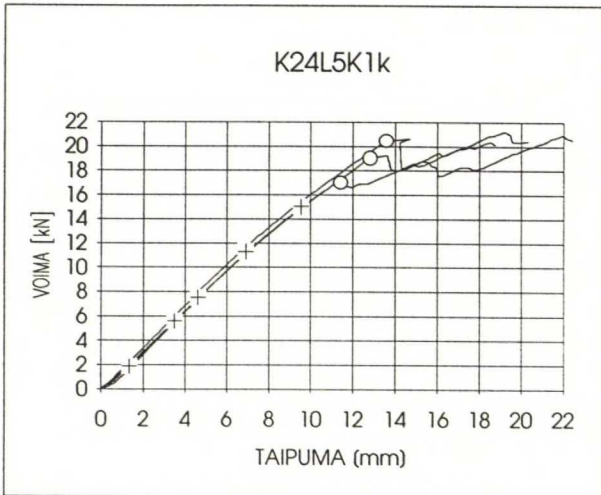
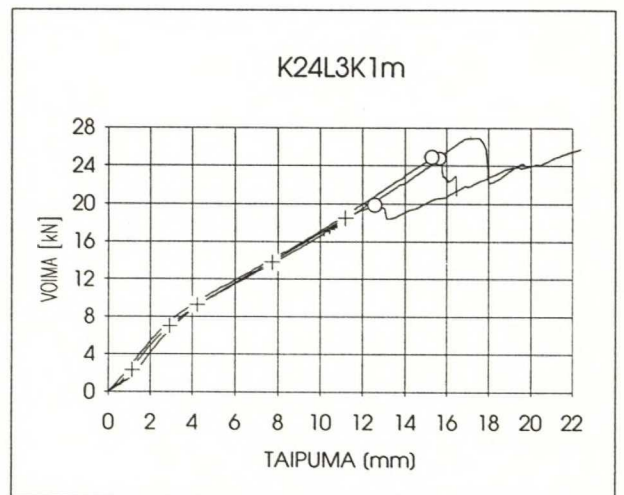
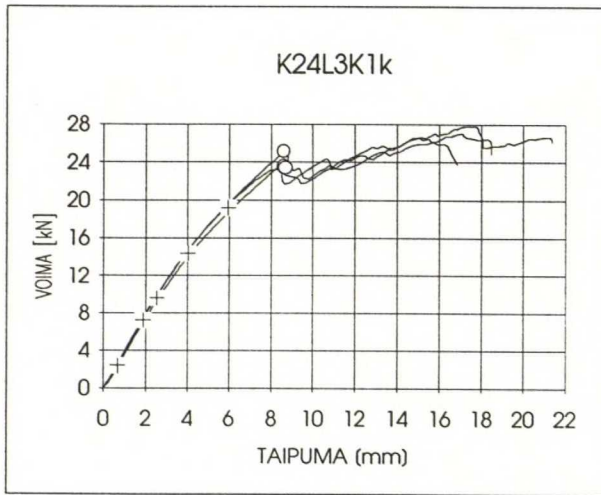
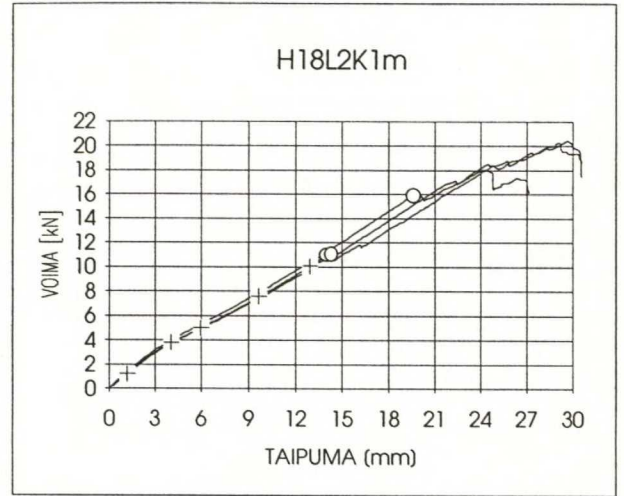
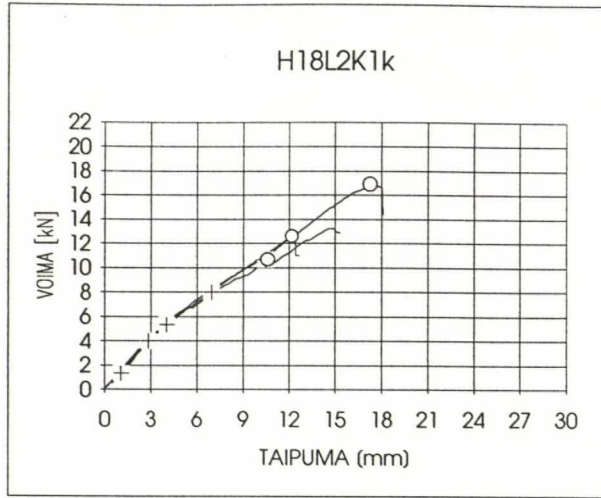


Kuva 17b. Lyhytaikaiskoekappaleiden kuormituspisteiden voima-taipumakuvaajat, murtopisteet ja keskimääräisistä murtokuormista lasketut 0,1; 0,3; 0,4; 0,6 ja 0,8 $\times F_{\text{murto}}$ vastaavat keskimääräiset taipumat.



+ (0,1 0,3 0,4 0,6 0,8) $\times F_{\text{murto}}$ vastaavat taipumat o murtopisteet

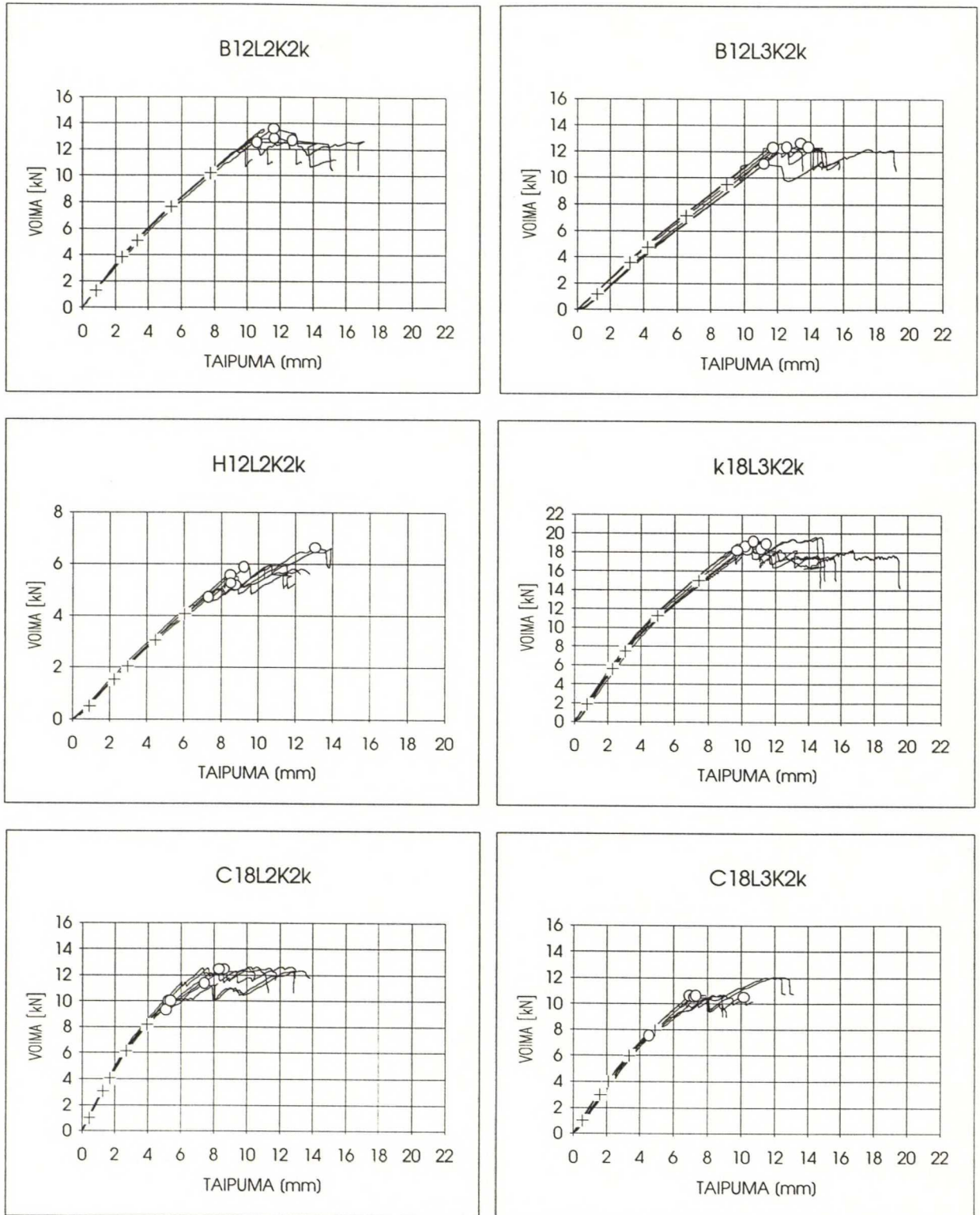
Kuva 17c. Lyhytaikaiskoekappaleiden kuormituspisteiden voima-taipumakuvaajat, murtopisteet ja keskimääräisistä murtokuormista lasketut 0,1; 0,3; 0,4; 0,6 ja 0,8 $\times F_{\text{murto}}$ vastaavat keskimääräiset taipumat.



+ (0,1 0,3 0,4 0,6 0,8)x F_{murtoa} vastaavat taipumat

○ murtopisteet

Kuva 17d. Lyhytaikaiskoekappaleiden kuormituspisteiden voima-taipumakuvaajat, murtopisteet ja keskimääräisistä murtokuormista lasketut 0,1; 0,3; 0,4; 0,6 ja 0,8x F_{murtoa} vastaavat keskimääräiset taipumat.



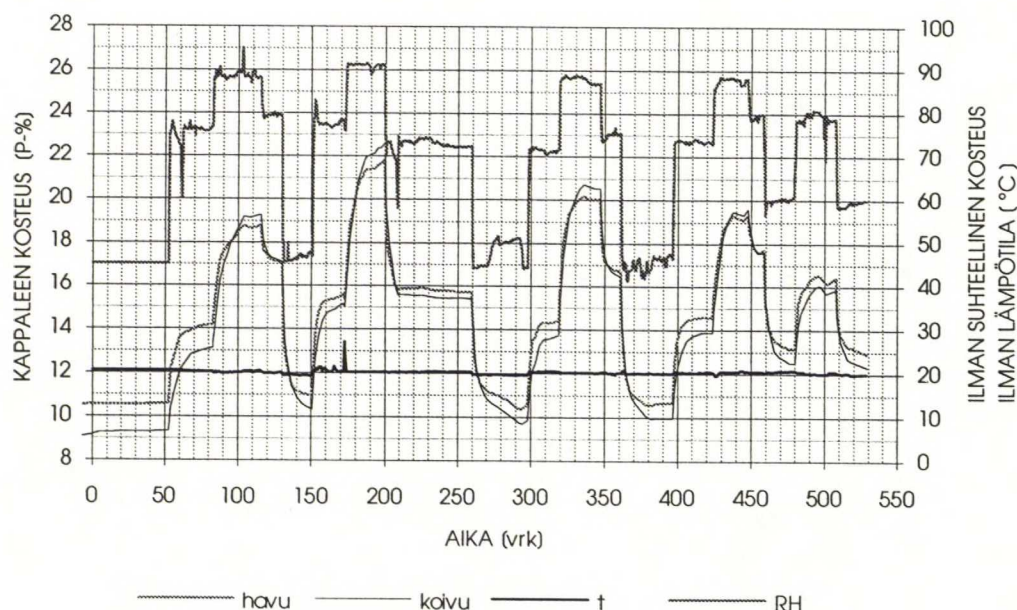
Kuva 17e. Lyhytaikaiskoekappaleiden kuormituspisteiden voima-taipumakuvaajat, murtopisteet ja keskimääräisistä murtokuormista lasketut 0,1; 0,3; 0,4; 0,6 ja 0,8 $\times F_{\text{murto}}$ vastaavat keskimääräiset taipumat.

7.2. PITKÄAIKAISKOKEIDEN TULOKSET

7.2.1. Säähuoneen olosuhteet ja kappaleiden kosteuspitoisuus

Koekappaleiden muodonmuutoksia ja painoa mitattiin sään muutosten jälkeisinä päivinä $\frac{1}{2}$ –1 vrk välein. Kappaleiden kosteuden tasaantuessa mittausväliä pidennettiin ja se oli pisimmillään noin 10 vrk. Kokeiden aikana säähuoneen ilmankosteutta vaihdeltiin portaittain siten että tavoitteena oli jaksotus RH 45→75→90→75→45→75 jne, eli kosteutta nostettiin ja laskettiin kahdessa vaiheessa. Kokeen lopussa pyrittiin tekemään muutama jakso edellisten minimi- ja maksimiarvojen sisällä, jolloin kosteutta vaihdeltiin välillä 80→60→80→60....

Käytettävissä ollut ilmastointilaite ei kuitenkaan pystynyt ylläpitämään haluttua kosteus- ja lämpötilatasoa vaan niissä oli pientä vaihtelua. Koneen kykyyn ylläpitää haluttuja olosuhteita vaikutti myös ulko- ja sisäilman suhteellinen kosteus ja lämpötila, sekä rakennuksen varsinainen ilmastointijärjestelmä. Säähuoneen olosuhteissa oli ajoittain havaittavissa selviä muutoksia viikonlopun aikana, jolloin varsinainen ilmastointi oli pois päältä. Kuvassa 18 on esitetty koekappaleiden arvioitu kosteuspitoisuus ja säähuoneesta mitattu ilman suhteellinen kosteus ja lämpötila puolen vuorokauden keskiarvoina. Koekappaleiden kosteuspitoisuus tarkistettiin 260 vrk:n kohdalla sahaamalla laattojen vertailukappaleista kosteusnäytepalat, joiden perusteella arviota korjattiin.



Kuva 18. Ilman suhteellinen kosteus sekä koekappaleiden kosteuspitoisuuden kehitys pitkäaikaiskokeessa. Kosteuspitoisuus arvioitu laattojen vertailukappaleista.

7.2.2. Pistekuormitetut laatat

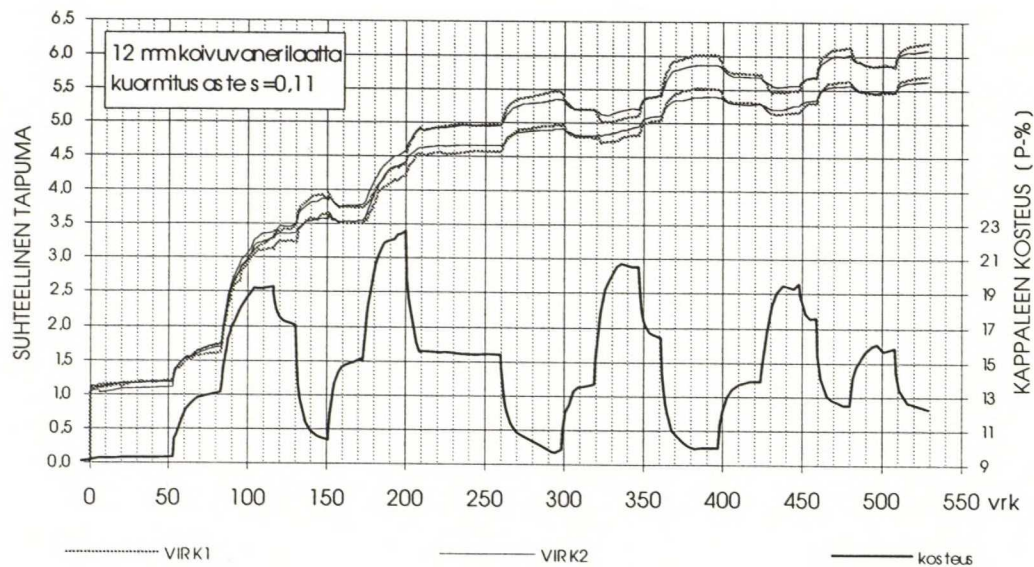
Koska laattojen teräksiset tukikehikot oli koottu hitsaamalla, ei tuilla ollut säätömahdollisuutta ja kaikki tuet eivät olleet täsmälleen samassa tasossa. Lisäksi tuet saattoivat olla toisiinsa nähden lievästi ristissä. Tukien sijaintivirheen suuruusluokka perustasoon nähden oli noin ± 1 mm. Alkutaipumien suuruuteen vaikutti myös "alkuklappi" eli laattojen alkukäyris-

tymät ja -taipumat. Nämä tuista ja koekappaleiden geometriasta johtuvat virheet pyrittiin korjaamaan mittaustuloksiin. Korjaus tehtiin asettamalla alkutaipuma lyhytaikaiskokeista saatuja taipumia vastaavaksi vähentämällä mittaustuloksista taulukossa 20 esitetyt arvot. Saman suuruinen korjaus tehtiin jokaiseen mittaustulokseen. Koska kuormia ei saatu lisättyä molempiin kenttiin tasaisesti ja samanaikaisesti saatiin myös eri kenttien epätasaisesta kuormituksesta johtuvat taipumaerot näin tasattua.

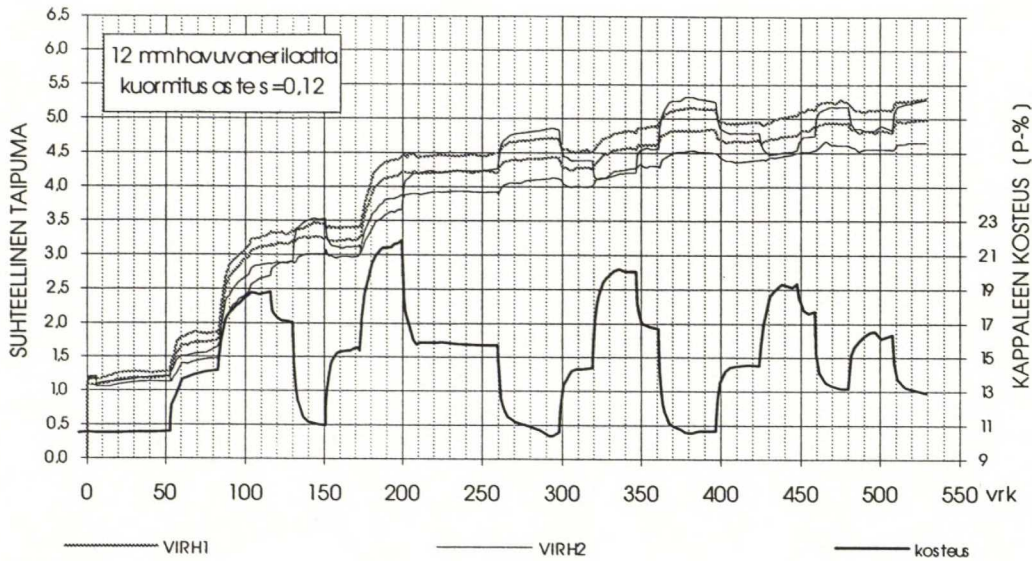
Taulukko 20. Pistekuormitettujen laattojen virumakokeiden mittaustuloksiin tehdyt virhekorjaukset.

vanerilaji	koekappaleen ja kentän tunnus	murtokokeiden keskimääräinen taipuma mm/kN	kentän kuorma	mitattu taipuma	korjaus mitattuihin taipumiin	korjattu alkutaipuma
koivu 12 mm	VIRK1A	0,93 mm	1,03 kN	1,90 mm	-0,90 mm	1,0 mm
	VIRK1B		1,03 kN	1,79 mm	-0,79 mm	
	VIRK2A		1,03 kN	2,71 mm	-1,71 mm	
	VIRK2B		1,02 kN	2,76 mm	-1,76 mm	
havu 12 mm	VIRH1A	1,51 mm	0,53 kN	1,23 mm	-0,43 mm	0,8 mm
	VIRH1B		0,53 kN	1,38 mm	-0,58 mm	
	VIRH2A		0,53 kN	0,82 mm	-0,02 mm	
	VIRH2B		0,53 kN	1,49 mm	-0,69 mm	

Kutakin sääjaksoa pidettiin yllä kunnes virumakappaleissa ei havaittu merkittävää taipuman muutosta eikä vertailukappaleissa merkittävää painon muutosta, eli kappaleet olivat saavuttaneet likimain tasapainokosteuden. Laattojen kuormituspisteiden suhteellinen viruma eli taipuma/alkutaipuma on esitetty kuvissa 18 ja 19. Koska koivuvanerin alkutaipuma oli 1,0 mm vastaa alkutaipuma myös taipumaa millimetreissä. Havuvanerin taipuma saadaan kertomalla suhteellinen viruma alkutaipumalla 0,8 mm. Kuvissa on myös vertailukappaleista mitattu kosteuspitoisuus. Kosteuspitoisuudesta on huomattava että kysymyksessä on kappaleiden keskimääräinen kosteus eli kostutusjaksolla pintaviilut ovat kosteampia kuin sisäviilut ja kuivatuksessa vastaavasti sisäviilut ovat kosteampia kuin pintaviilut.



Kuva 19. Pistekuormitetun 12 mm koivuvanerilaatan suhteellinen viruma ja koekappaleen kosteuspitoisuus.

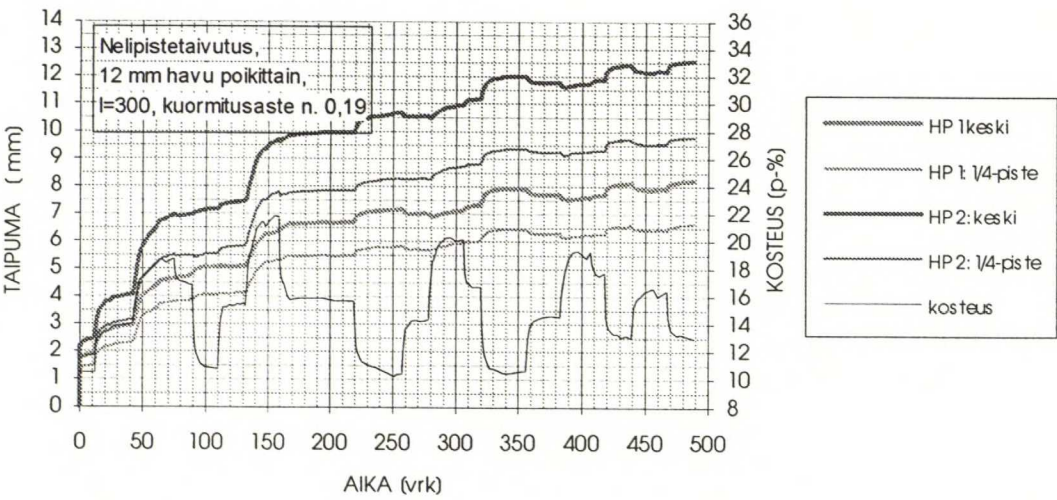
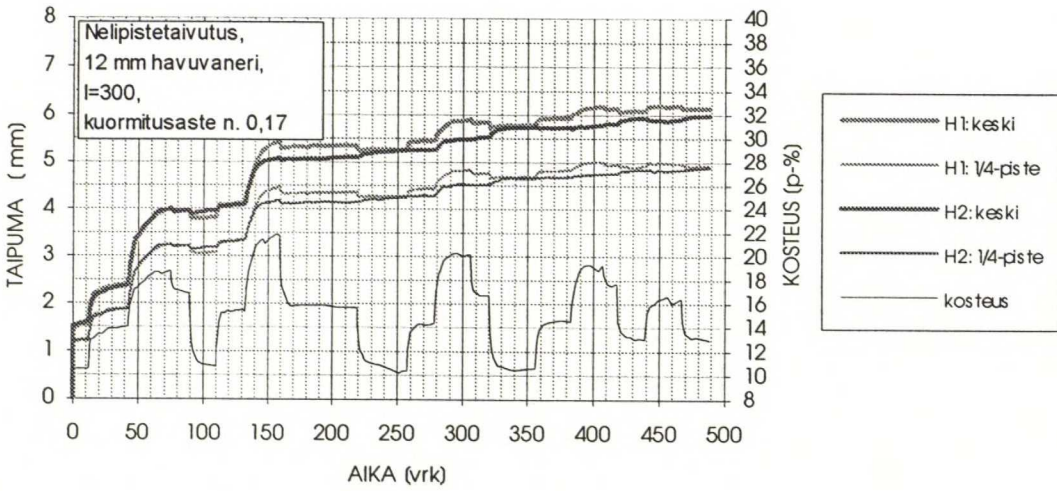
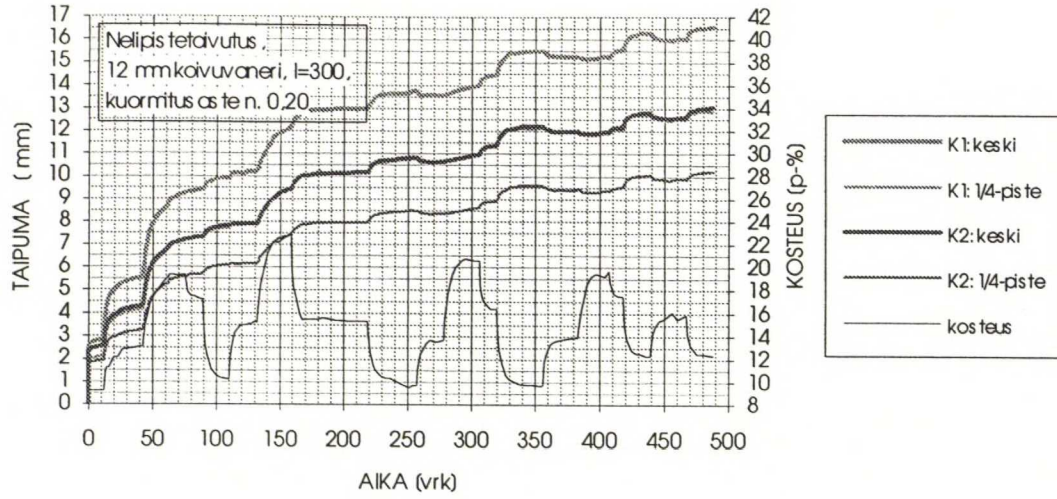


Kuva 20. Pistekuormitetun 12 mm havuvanerilaatan suhteellinen viruma ja koekappaleiden kosteuspitoisuus.

Koelaattojen kuormituspisteiden kokonaistaipumat tämän työn valmistuessa, eli 529 vrk:n ja viiden kostutus-kuivatus -syklin jälkeen olivat koivuvanerilaatoilla keskimäärin 5,91 mm ja havuvanerilaatoilla keskimäärin 4,04 mm.

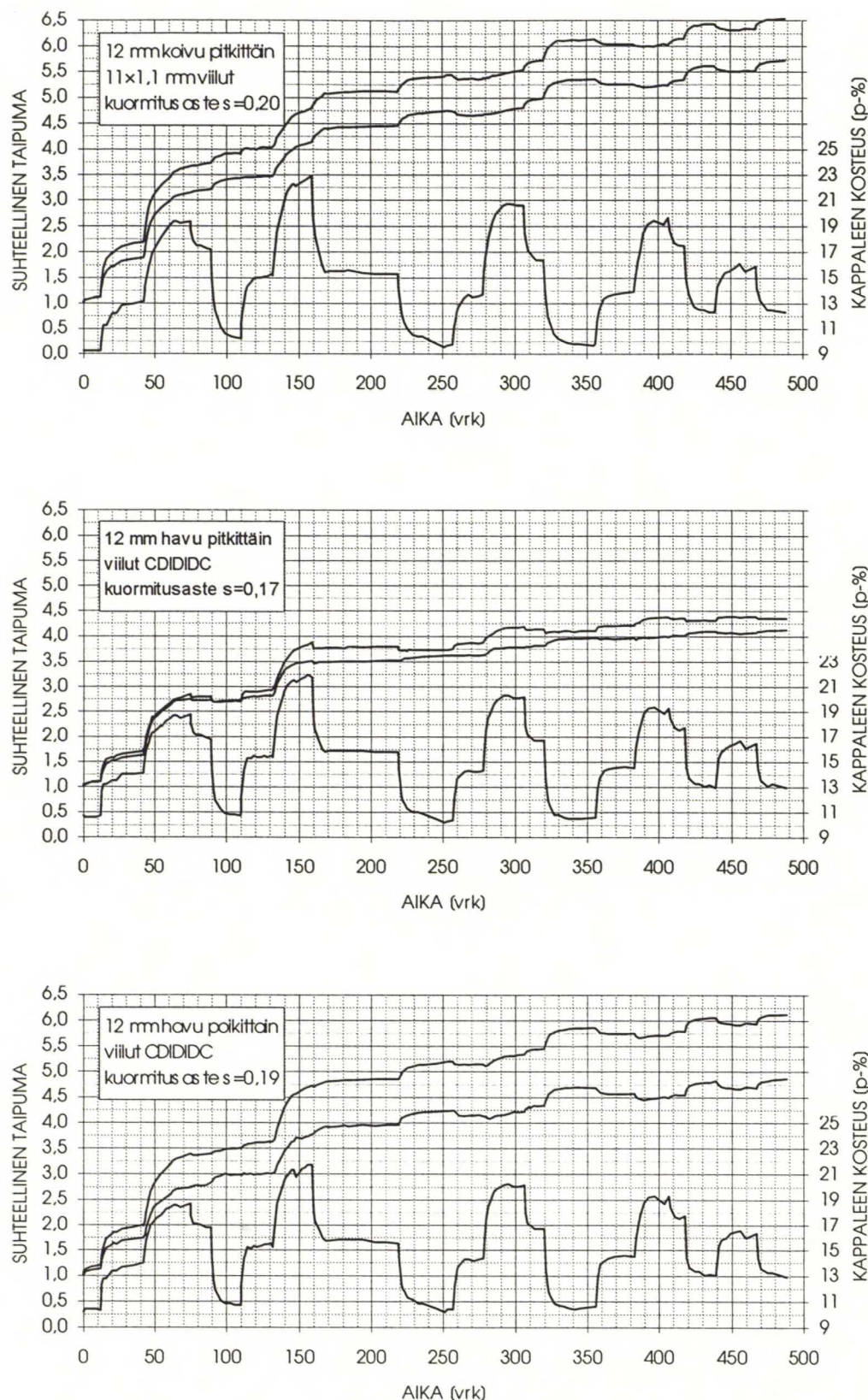
7.2.3. Nelipistetaivutus

Nelipistetaivutettujen koekappaleiden taipumat millimetreissä on esitetty kuvassa 21. Kuvis- ta nähdään heti vanerin ominaisuuksien suuri hajonta, sillä ainoastaan pitkittäin kuormitetun havuvanerin kummankin koekappaleen kuvaajat ovat lähellä toisiaan kun taipuman suuruus koivulla on jopa 1,3-kertainen ja poikittain kuormitetulla havulla 1,5-kertainen enemmän taipunutta koekappaletta pienempään verrattaessa. Vaikka havuvanerin lujuusominaisuuksilla on suurempi hajonta kuin koivuvanerilla, niin tässä tapauksessa pitkittäin kuormitetun havuvanerin taipumien tasaisuus selittyy ainakin osaltaan sillä, että kysymyksessä on pak-suviiluininen havuvaneri, jolloin poikittaisten viilujen suhteellinen osuus kuormitussuunnassa on melko vähäinen.



Kuva 21. Nelipistetaivutettujen koekappaleiden taipumat ja kosteuspitoisuuden kehitys virumakokeen aikana.

Kappaleiden keskipisteiden suhteelliset taipumat on esitetty kuvassa 21. Suhteellinen viruma on koivuvanerilla selvästi voimakkaampaa kuin havuvanerilla.



Kuva 22. 4-pistetaivutettujen koekappaleiden keskipisteiden suhteelliset taipumat sekä kosteuspitoisuuden kehitys.

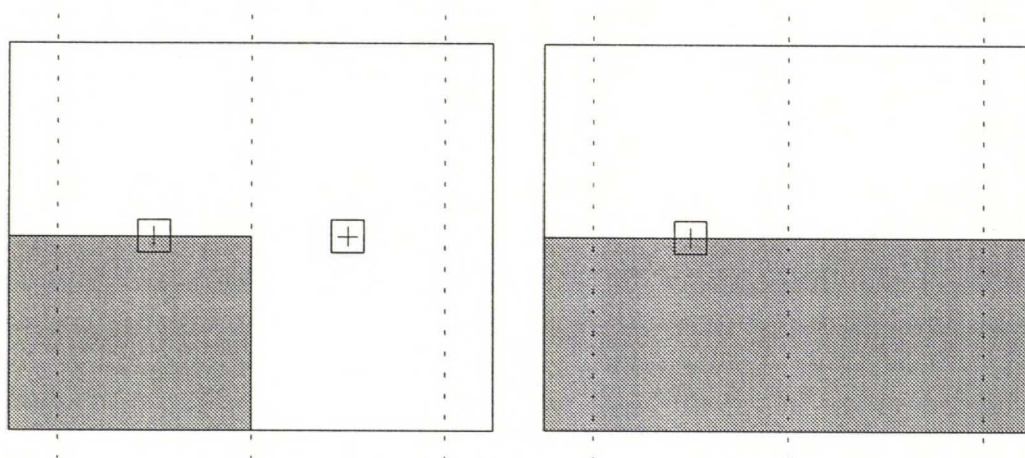
8. NISA-FEM LASKENTA

Lyhytaikaiskokeiden eri kuormitustapaukset laskettiin elementtimenetelmään perustuvalla NISA II -ohjelmistolla (Numerically Integrated Element for System Analysis). Ohjelman tarvitsema malli luotiin DISPLAY III -ohjelmistolla joka on integroitu interaktiivinen graafinen ohjelma, joka mahdollistaa geometrinen mallien luomisen paitsi rakentellisiin myöskin virtausteknillisiin probleemoihin. NISA II -ohjelman laskentatulokset voidaan esittää graafisesti DISPLAY III -ohjelmistolla. Molemmat ohjelmistot ovat EMRC:n (Engineering Mechanics Research Corporation) kehittämiä ja markkinoimia.

8.1. MALLIN LUOMINEN

8.1.1. Geometria ja reunaehdot

Lyhytaikaiskokeiden kustakin kuormitustapauksesta laadittiin geometrinen malli käyttäen hyväksi rakenteen symmetriaa. Molemmista kentistä kuormitettujen laattojen malli muodostui laatan $\frac{1}{4}$ -osasta, eli laatan päästä keskituelle ja laatan reunasta laatan pituussuuntaiseen keskiviivaan. Toisesta kentästä kuormitettujen laattojen malli muodostui pituussuuntaisen keskiviivan suhteen symmetrisestä puolikkaasta (kuva 23).



Kuva 23. NISA-FEM -laskennassa käytetty symmetria eri kuormitustapauksissa. Elementtiverkko muodostettiin varjostetulle alueelle suorakulmaisista elementeistä ja verkon tiheys suurimmillaan kuormituspisteen kautta kulkevilla kaistoilla.

Elementtiverkko muodostui 4-kulmaisista 4-solmuisista kerroselementeistä (NKTP 32). Elementtien koko valittiin siten, että verkko oli tiheimmillään kuormituspisteiden kautta kulkevilla kaistoilla ja kuormituspisteen ympäristössä 50 mm:n etäisyydellä. Elementin muoto kuormituspisteessä ja sen läheisyydessä oli neliö, muuttuen reuna-alueilla suorakaiteeksi. Pienimmillään elementin koko oli $6,25 \times 6,25 \text{ mm}^2$ eli kuormituspiste oli jaettu 8×8 elementtiin, josta siis symmetrisessä mallissa oli puolet, eli 8×4 elementtiä. Siirryttäessä kauemmaksi kuormituspisteen vaikutusalueelta verkon tiheyttä pienennettiin laskennan nopeuttamiseksi ja käytettävissä olleen tietokoneen levytilan säästämiseksi.

Laskenta tehtiin 1 kN/kuormituspiste vastaavalla kuormalla, eli kuormituspisteen alueella oleville elementeille määritettiin 0,4 N/mm² suuruinen tasainen kuorma. Tällä kuormalla laskettuja taipuma-arvoja verrattiin lyhytaikaiskokeissa saatuihin 1 kN:n kuormaa vastaaviin taipumiin.

Kuormitustapausten symmetriaan perustuen mallille määritettiin tukien kohdalle ja laatan pituussuuntaiselle keskiviivalle tukiehdot (Boundary Conditions). Tukiehdot olivat seuraavat (u=siirtymä, Rot=kiertymä):

Päätytuot:	uz=Rotx=0	
Keskituki K2:	ux=uz=Rotx=Roty=0	keskialueella
	ux=Ry=0	reuna-alueella
Keskiviiva:	uy=Rotx=0	
Keskituki K1 ja K4	uz=Rotx=0	keskialueella

Päätytuilla siis sallitiin laatan kiertyminen tuen eli y-akselin ympäri. Laatan pystysuuntainen eli z-akselin suuntainen siirtymä oli estetty. Keskituella puolestaan sallitiin laatan nousu reuna-alueella mikä vastasi koeolosuhteita (ylätuki vain päädyissä). Koska laskenta suoritettiin lineaarisena ja tukiehdoiksi voitiin määrittää vain joko vapaa tai täysin kiinni, piti keskituen ensimmäisen z-suunnassa kiinnitetyn solmun paikka arvioida. Muutamalla koeajolla tarkistettiin, että pieni virhearvio tukireaktion nollakohtaan, eli ensimmäiseen irti olevaan solmuun ei vaikuttanut merkittävästi ohjelman laskemaan maksimitaipumaan.

8.1.2. Laskennassa käytetyt vakiot

Laskennassa tarvittavat materiaaliarvot taulukoitiin kolmeen taulukkoon: viilun eli kerroksen paksuus (property-id), viilun syynsuunnan eli kerroksen pääsuunnan ja rakenteen pääsuunnan välinen kulma (lamangle-id) ja eri kerrosten kimmovakiot (material-id). Näistä taulukoista muodostettiin edelleen yhdistelmät eri vanerityypeille ja kosteustapauksille jotka taulukoitiin omaan taulukkoon (MAT-ID).

Lyhytaikaiskokeissa oli kaikkiaan 28 erilaista kuormitustapausta kun otettiin huomioon vanerityyppi, vanerin kosteus, jänneväli ja kuormitustyyppi. Kukin laskentatapausta laskettiin viilukerroksen teoreettisilla ja redusoiduilla kimmoarvoilla. Näin saatiin yhteensä 56 laskentatapausta. Näissä oli yhteensä 28 erilaista materiaaliarvojen yhdistelmää jotka on esitetty liitteessä 4.

Viilukerrosten paksuudessa otettiin huomioon viilujen paksuusturpoama. Kerrosten paksuudet arvioitiin lyhytaikaiskoekappaleista mitatuista koekappaleiden paksuuksista. Näin saatiin yhteensä kymmenen paksuusarvoa. Kokeissa olleiden vanerityyppien viilujen nimellispaksuudet olivat 1,1 mm, 1,4 mm ja 2,5 mm.

Kuormituskokeissa olleet vanerit olivat normaaleja ristiinliimattuja vanereita, joten viilukulmina oli 0° ja 90°.

Taulukko 21. NISA-laskennassa käytetyt viilujen materiaaliarvotaulukot.

viilupaksuus (=property-id)	1	1,10 mm	viilukulma (=lamangle-id)	1	0°	kimmovakiot A (=material-id)	1	koivu 10,8 %
	2	1,40 mm		2	90°		2	havu 10,8 %
	3	2,50 mm					3	koivu 22,5 %
	4	1,36 mm					4	havu 22,5 %
	5	1,00 mm					5	koivu 13,0 %
	6	1,20 mm					6	havu 13,0 %
	7	1,32 mm				kimmovakiot B (=material-id)	7	koivu 10,8 %
	8	1,16 mm					8	havu 10,8 %
	9	1,44 mm					9	koivu 22,5 %
	10	2,54 mm					10	havu 22,5 %
							11	koivu 12,0 %
							12	havu 12,0 %
						(C18 sekavaneri)	13	havu 12,0 %
						(C18 sekavaneri)	14	koivu 12,0 %

Kimmoarvot taulukoitiin lyhytaikaiskokeista mitattuihin kolmeen eri keskimääräiseen kosteuspitoisuuteen: 10,80 %, 22,5 % ja 12,0 %. Kimmo- ja liukukertoimina käytettiin eri lähteistä koottuja, sivuilla 16 ja 17 esitettyjä kosteudesta riippuvia arvoja. Suppeu- makertoimina käytettiin taulukon 5 arvoja (Kollmann & Côté). Poissonin vakioille ei tässä tehty kosteusreduktiota.

Koposen /6/ laskentatulosten mukaan kuorielementillä laskettujen laattojen leikkausmuodonmuutokset vastaavat liukumia laatalle, jonka liukukerroin on erisuuntaisten viilujen liukukertoimien keskiarvo kun sen tulisi olla lähempänä pienempää liukukerointa. Tämän johdosta laskenta tehtiin käyttämällä viilun molemminsuuntaisille liukukertoimille myös redusoituja arvoja. Redusoituina liukukertoimina käytettiin vanerin näennäisiä keskimääräisiä liukukertoimia, jotka johdettiin lähtemällä yleisistä liukukertoimen laskentakaavoista ja kaa-vojen (22) ja (32) mukaisista rolling-liukukertoimen kosteusriippuvista arvosta seuraavasti.

$$\tau = G \cdot \gamma = \frac{F}{a \cdot b}$$

$$\Leftrightarrow G = \frac{F}{a \cdot b \cdot \gamma} \quad (76)$$

missä τ on leikkausjännitys
 F vaikuttava voima
 $a \cdot b$ leikkautuvan pinnan pinta-ala
 γ liukukulma

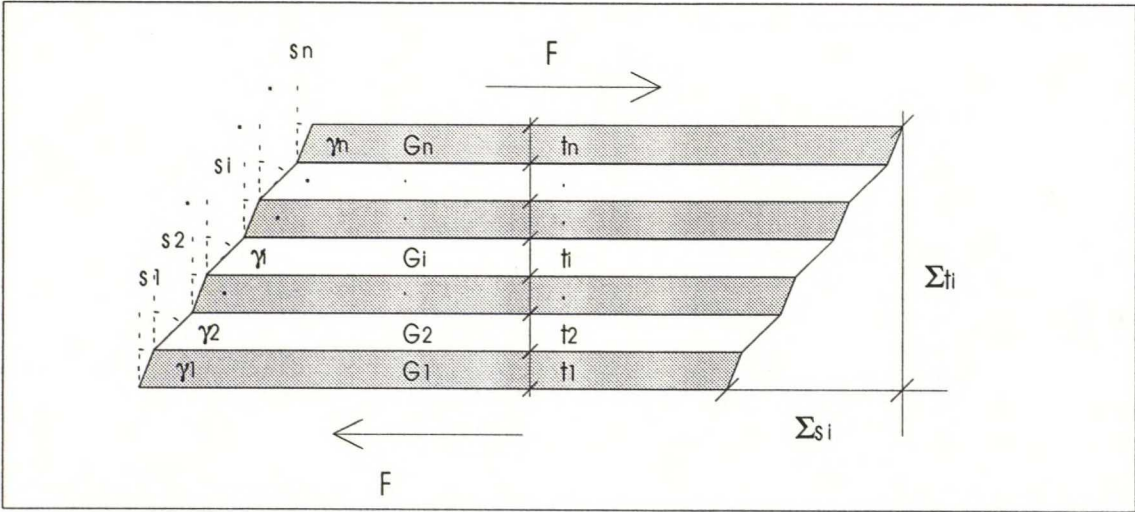
merkitsemällä $F=1$ ja $a \cdot b=1$ ja olettamalla kulma γ hyvin pieneksi, jolloin $\tan \gamma = \gamma = s/t$ saadaan

$$G = \frac{t}{s} \frac{N}{\text{mm}^2} \quad (77)$$

missä t on paksuus
 s liukuma

Kun tiedetään kerroksellisen rakenteen eri kerrosten paksuudet ja liukukertoimet, voidaan koko rakenteelle laskea näennäinen liukukerroin G_{red} kuvan 24 merkintöjä käyttäen seuraavasti:

$$G_{red} = \frac{\sum_{i=1}^n t_i}{\sum_{i=1}^n \frac{t_i}{G_i}} \quad (78)$$



Kuva 24. Voimasta F aiheutuvat kerroksellisen rakenteen liukumukset ja kaavassa (78) käytetyt merkinnät.

Redusoidun liukukertoimen laskennassa käytettiin lähtöarvoina funktioita (22) ja (32), jotka ottavat huomioon rollingliukukertoimen kosteusriippuvuuden. Liukukertoimen G_{lr} arvioitiin muuttuvan likimain samassa suhteessa. Taulukkoon 22 on laskettu edellä esitetyllä tavalla kunkin kokeissa käytetyn vanerityypin näennäinen liukukerroin ja näiden perusteella NISA-laskentaan valitut liukukertoimien arvot koivu- ja havuviiluille eri kosteuspitoisuuksissa.

Taulukko 22. Eri vanerityyppien koko rakenteelle lasketut näennäiset liukukertoimet ja niiden perusteella NISA-laskentaan valitut viilujen liukukertoimet.

								vaneriviulun liukukerroin					
								u=10,8 %		u=22,5 %		u=12 %	
								Glr	Gtr	Glr	Gtr	Gtr	Glr
		koivuviilu havuviilu						1200 620	117 35	800 380	72 21	1150 590	112 33
		viilujen lkm eri suunnissa						vanerirakenteen näennäinen liukukerroin					
		1,1		1,4		2,5		u=10,8 %		u=22,5 %		u=12 %	
vaneri- tyyppi	laji ja paksuus	x	y	x	y	x	y	Gxz	Gyz	Gxz	Gyz	Gyz	Gxz
1.	K12	6	5					230	198	143	123	221	190
2.	K18	2		5	6			221	206	137	127	212	197
3.	K24	11	10					222	205	138	127	212	196
4.	H12			2	3	2		91	52	54	31	85	49
5.	H18	2		2		1	4	59	76	35	46	55	72
6.	B12	2		3	4			226	202	140	125	216	194
7.	C18	2		5	6			203	65	125	39	194	62
NISA-laskentaan valitut viilujen liukukertoimet								u=10,8 %		u=22,5 %		u=12 %	
								Glr	Gtr	Glr	Gtr	Glr	Gtr
koivuvanerin viilut keskimäärin								220	200	140	125	215	194
havuvanerin viilut keskimäärin								73	64	44	38	69	60
sekavanerin viilut keskimäärin								203	65	125	39	194	62

Viilujen kimmokertoimelle E_r ei ole esitetty kirjallisuudessa kosteusriippuvuutta, joten se on laskettu kimmokertoimesta E_t suppeumakertoimien ν_{rt} ja ν_{tr} avulla. Niinikään viilun pituus-suuntaiselle tasoliukukertoimelle ei löydy kirjallisuudesta kosteusriippuvuutta joten sen suuruus on arvioitu lähtemällä liikkeelle arvoista 1200 N/mm² koivuviilulle ja 620 N/mm² havuviilulle kosteudessa 10,8%. Näitä arvoja on muutettu eri kosteuspitoisuuksissa likimain samassa suhteessa kuin liukukertoimia G_{ft} ja G_{rt} .

Taulukko 23. NISA-laskennassa käytetyt kimmovakiot eri levytyypeille ja kosteuspitoisuuksille.

MATERIAL-ID A								
	1: KOIVU u=10,8 %	2: HAVU u=10,8 %	3: KOIVU u=22,5 %	4: HAVU u=22,5 %	5:KOIVU u=12,0 %	6: HAVU u=12,0 %		
EX	17655 N/mm2	13697 N/mm2	14075 N/mm2	10878 N/mm2	17288 N/mm2	13408 N/mm2		
EY	553 N/mm2	396 N/mm2	483 N/mm2	338 N/mm2	546 N/mm2	390 N/mm2		
EZ	996 N/mm2	693 N/mm2	869 N/mm2	591 N/mm2	982 N/mm2	682 N/mm2		
NUXY ν_{lt}	0,44	0,53	0,44	0,53	0,44	0,53		
NUXZ ν_{lr}	0,49	0,43	0,49	0,43	0,49	0,43		
NUYZ ν_{tr}	0,40	0,24	0,40	0,24	0,40	0,24		
GXY	613 N/mm2	351 N/mm2	426 N/mm2	216 N/mm2	594 N/mm2	337 N/mm2		
GXZ	1200 N/mm2	620 N/mm2	800 N/mm2	380 N/mm2	1150 N/mm2	590 N/mm2		
GZY	117 N/mm2	35 N/mm2	72 N/mm2	21 N/mm2	112 N/mm2	33 N/mm2		
MATERIAL-ID B (G redusoitu)							sekavanerin C18 viilujen redusoidut arvot	
	7: KOIVU u=10,8 %	8: HAVU u=10,8 %	9: KOIVU u=22,5 %	10: HAVU u=22,5 %	11:KOIVU u=12,0 %	12: HAVU u=12,0 %	13:HAVU u=12,0 %	14: KOIVU u=12,0 %
EX	17655 N/mm2	13697 N/mm2	14075 N/mm2	10878 N/mm2	17288 N/mm2	13408 N/mm2	13408 N/mm2	17288 N/mm2
EY	553 N/mm2	396 N/mm2	483 N/mm2	338 N/mm2	546 N/mm2	390 N/mm2	390 N/mm2	546 N/mm2
EZ	996 N/mm2	693 N/mm2	869 N/mm2	591 N/mm2	982 N/mm2	682 N/mm2	682 N/mm2	982 N/mm2
NUXY ν_{lt}	0,44	0,53	0,44	0,53	0,44	0,53	0,53	0,44
NUXZ ν_{lr}	0,49	0,43	0,49	0,43	0,49	0,43	0,43	0,49
NUYZ ν_{tr}	0,40	0,24	0,40	0,24	0,40	0,24	0,24	0,4
GXY	613 N/mm2	351 N/mm2	426 N/mm2	216 N/mm2	594 N/mm2	337 N/mm2	337 N/mm2	594 N/mm2
GXZ	220 N/mm2	73 N/mm2	140 N/mm2	44 N/mm2	215 N/mm2	69 N/mm2	194 N/mm2	194 N/mm2
GZY	200 N/mm2	64 N/mm2	125 N/mm2	38 N/mm2	194 N/mm2	60 N/mm2	62 N/mm2	62 N/mm2

8.2. LASKENNAN TULOKSET

Ohjelman laskemat tulokset on esitetty taulukoissa 24 ja 25. Taulukossa 24 on laskenta-arvoilla A saadut tulokset ja taulukossa 25 redusoiduilla liukukertoimien arvoilla lasketut tulokset. Laskettuja taipumia vertailemalla huomataan, että viilujen teoreettisilla arvoilla lasketut taipumat ovat selvästi pienempiä kuin redusoiduilla arvoilla lasketut. Ero B-arvoista A-arvoihin vaihtelee välillä 25-50 %. Jännityksiin SXX ja SY Y redusoinnilla ei ollut merkittävää vaikutusta. Laskennasta on esimerkki liitteessä 4.

Taulukko 24. NISA-laskennassa saadut maksimitaipumat, -leikkausvoimat, -momentit ja -jännitykset 1kN:n kuormituksella kimmoarvoilla A .

laatta KUIVAT: 10,80%	KUORMITUSPISTE						TUKI	KUORMA	
	MAT-ID	w	QX	QY	MX	MY	MY	SXX	SY
	A	A	A	A	A	A	A	A	A
		mm	N/mm	N/mm	Nmm	Nmm	Nmm	N	N
k18i2k2k	2	0,20	-6,25	4,38	148	241	-232	6,75	0,29
h18i2k2k	5	0,31	-5,77	4,77	184	223	-208	7,43	0,28
k12i3k2k	1	0,78	-6,14	4,36	156	266	-247	15,18	0,66
h12i3k2k	4	1,06	-6,46	4,10	143	288	-266	14,89	0,68
k24i3k2k	3	0,14	-5,89	4,57	177	255	-230	4,63	0,19
k24i5k2k	3	0,37	-5,57	4,67	233	321	-253	5,82	0,25
k24i3k4k	3	0,12	-6,86	4,41	154	224	-138	4,07	0,17
k24i5k4k	3	0,30	-6,13	4,60	201	284	-158	5,16	0,22
k18i2k1k	2	0,26	-5,73	4,45	161	277	-116	7,78	0,32
h18i2k1k	5	0,39	-5,32	4,83	199	257	-104	8,57	0,31
k24i3k1k	3	0,18	-5,48	4,61	190	292	-114	5,30	0,21
k24i5k1k	3	0,50	-5,30	4,69	245	362	-127	6,58	0,27
MÄRÄT:22,5 %									
k18i2k2m	7	0,23	-6,24	4,39	152	243	-231	6,07	0,29
h18i2k2m	10	0,39	-5,80	4,75	187	229	-209	6,94	0,29
k12i3k2m	6	0,86	-6,13	4,37	159	268	-248	13,74	0,66
h12i3k2m	9	1,31	-6,48	4,09	146	293	-267	14,40	0,71
k24i3k2m	8	0,17	-5,88	4,57	182	258	-229	4,21	0,19
k24i5k2m	8	0,41	-5,57	4,68	238	325	-253	5,28	0,25
k18i2k1m	7	0,29	-5,73	4,46	165	281	-115	7,00	0,32
h18i2k1m	10	0,48	-5,35	4,81	201	265	-104	8,01	0,32
k24i3k1m	8	0,21	-5,48	4,62	195	296	-114	4,82	0,21
k24i5k1m	8	0,55	-5,30	4,70	251	366	-127	5,96	0,27
KUIVAT: 12,0 %									
b12i2k2k	11	0,56	-6,31	4,33	143	242	-237	13,94	0,60
h12i2k2k	14	0,79	-6,70	4,03	128	265	-258	13,66	0,63
c18i2k2k	13	0,26	-5,78	4,77	176	223	-212	6,01	0,26
b12i3k2k	11	0,80	-6,10	4,40	159	263	-245	15,18	0,66
k18i3k2k	12	0,28	-5,95	4,51	170	257	-236	7,50	0,31
c18i3k2k	13	0,36	-5,60	4,83	194	243	-222	6,64	0,28

Taulukko 25.NISA-laskennassa saadut maksimitaipumat, -leikkausvoimat, -momentit ja jännitykset 1 kN:n kuormituksella kimmoarvoilla B.

laatta KUIVAT: 10,80%	KUORMITUSPISTE						TUKI	KUORMA	
	MAT-ID	w	QX	QY	MXX	MYX	MYX	SXX	SYY
	B	B	B	B	B	B	B	B	B
		mm	N/mm	N/mm	Nmm	Nmm	Nmm	N	N
k18i2k2k	16	0,29	-6,06	4,52	162	240	-214	6,74	0,31
h18i2k2k	19	0,61	-5,77	4,70	202	235	-185	7,84	0,31
k12i3k2k	15	0,93	-6,01	4,47	164	264	-241	15,10	0,69
h12i3k2k	18	1,60	-6,09	4,43	165	281	-243	14,51	0,74
k24i3k2k	17	0,22	-5,76	4,67	193	257	-213	4,66	0,20
k24i5k2k	17	0,46	-5,49	4,76	244	322	-245	5,84	0,26
k24i3k4k	17	0,18	-6,64	4,55	170	226	-120	4,10	0,17
k24i5k4k	17	0,37	-6,02	4,71	214	285	-149	5,17	0,23
k18i2k1k	16	0,35	-5,59	4,58	172	277	-107	7,76	0,33
h18i2k1k	19	0,68	-5,37	4,77	211	270	-93	8,99	0,33
k24i3k1k	17	0,25	-5,39	4,71	204	293	-106	5,32	0,22
k24i5k1k	17	0,58	-5,26	4,78	256	363	-123	6,59	0,28
MÄRÄT:22,5 %									
k18i2k2m	21	0,37	-6,02	4,56	170	244	-206	6,08	0,31
h18i2k2m	24	0,89	-5,75	4,73	211	245	-177	7,40	0,32
k12i3k2m	20	1,10	-5,99	4,50	170	267	-239	13,67	0,69
h12i3k2m	23	2,19	-6,05	4,46	173	286	-238	14,03	0,79
k24i3k2m	22	0,28	-5,73	4,69	202	261	-206	4,25	0,21
k24i5k2m	22	0,55	-5,49	4,78	252	326	-242	5,30	0,26
k18i2k1m	21	0,42	-5,56	4,60	179	281	-103	7,00	0,34
h18i2k1m	24	0,96	-5,37	4,77	218	279	-89	8,45	0,35
k24i3k1m	22	0,32	-5,37	4,73	212	298	-103	4,85	0,22
k24i5k1m	22	0,68	-5,25	4,79	263	367	-121	5,98	0,27
KUIVAT: 12,0 %									
b12i2k2k	25	0,70	-6,18	4,44	152	241	-228	13,89	0,62
h12i2k2k	28	1,30	-6,27	4,37	152	259	-225	13,35	0,69
c18i2k2k	27	0,40	-5,96	4,59	180	238	-204	6,48	0,26
b12i3k2k	25	0,96	-5,98	4,50	167	262	-239	15,12	0,68
k18i3k2k	26	0,39	-5,84	4,62	183	258	-225	7,50	0,33
c18i3k2k	27	0,50	-5,80	4,64	196	258	-217	7,03	0,29

9. TULOSTEN ANALYSOINTI

9.1. ERI LASKENTAMENETELMIEN TARKKUUS MUODONMUUTOSTEN LASKENNASSA

9.1.1. Käsinlaskentamenetelmät

Koekuormituksissa saatuja taipumia verrattiin eri menetelmillä laskettuihin taipumiin. Toisesta kentästään kuormitettujen laattojen taipumia verrattiin RIL 162 ohjeiden mukaisesti kaavan (56) ja kuvan 11 avulla laskettuihin taipumiin. Molemmista kentistään kuormitettujen laattojen taipumia verrattiin Handbook of Finnish Plywood taulukoiden arvoihin.

Taulukko 26. Pistekuormituskokeiden keskipisteen taipuman vertailu käsinlaskentamenetelmillä laskettuihin taipumiin.

Kokeissa mitattujen taipumien vertailu eri laskentamenetelmillä saatuihin taipumiin:									
Taipuma, mm/kN		koe/H-book			Taipuma, mm/kN		koe/RIL		
tunnus	koe	H-book		keskim.	tunnus	koe	RIL ym		keskim.
K18L2K2k	0,32	0,17	1,8	2,1	K18L2K1k	0,35	0,17	2,1	2,2
H18L2K2k	0,67	0,21	3,3		H18L2K1k	0,68	0,26	2,6	
K12L3K2k	0,93	0,60	1,6		K24L3K1k	0,25	0,11	2,3	
H12L3K2k	1,51	0,75	2,0		K24L5K1k	0,57	0,31	1,8	
K24L3K2k	0,22	0,10	2,2						
K24L5K2k	0,48	0,25	1,9						
B12L2K2k	0,64	0,50	1,3	1,8	K18L2K1m	0,59	0,20	2,9	2,8
H12L2K2k	1,32	0,63	2,1		H18L2K1m	1,14	0,35	3,3	
C18L2K2k	0,40	0,21	2,0		K24L3K1m	0,39	0,13	2,9	
B12L3K2k	0,86	0,60	1,4		K24L5K1m	0,71	0,37	1,9	
K18L3K2k	0,41	0,21	2,0						
C18L3K2k	0,53	0,25	2,1						

Nyt tehtyjen kuormituskokeiden taipumat olivat molemmista kentistään kuormitetuille laatoille noin kaksinkertaiset taulukkoarvoihin verrattuna. Toispuolisesti kuormitetuilla laatoilla ero koetuloksista kaavan (56) mukaisesti laskettuihin arvoihin oli jopa 2,8-kertainen. Taulukon 26 arvojen perusteella voidaankin sanoa, että laskentamenetelmät jotka perustuvat vanerin homogenisoituihin kimmokertoimiin ja jättävät tasojen väliset liukumata huomioimatta, eivät anna taipumille tarkkoja tuloksia. Vaikka vertailulaskemat tehtiin taulukoista saatavilla kimmokertoimilla sen sijaan, että ne olisi määritetty koevanereille esimerkiksi 4- ja 5-pistetaivutuksilla, voidaan vertailun perusteella kuitenkin sanoa, että pistekuormitettujen laattojen taipumista merkittävä osuus johtuu leikkausmuodonmuutoksista.

9.1.2. NISA-laskenta

NISA-laskennan tarkkuutta arvosteltiin vertaamalla lyhytaikaiskokeiden taipumia laskennassa saatuihin tuloksiin. Vertailu tehtiin laskemalla suhdeluku w_{NISA}/w_{koe} . Taulukkoon 27 kootut suhdeluvut osoittavat todeksi aikaisemmin esitetyn oletuksen siitä, että ohjelma ei ota riittävästi huomioon leikkausmuodonmuutoksia, jos viilujen kimmo- ja liukukertoimien ar-

voina käytetään niiden teoreettisia arvoja. Arvoilla A eli viilujen teoreettisilla arvoilla laskennalliset taipumat jäivät selvästi alle kokeellisten arvojen. Redusoiduilla liukukertoimien arvoilla päästään hyvin lähelle kokeellisia arvoja, sillä näillä arvoilla laskettaessa suhdeluku w_{NISA}/w_{koe} oli kuivilla koekappaleilla keskimäärin 0,97-1,00 vanerilajista riippuen. Laskennassa tehty kimmokertoimien kosteusreduktio puolestaan ei ole riittävä, sillä kosteiden koivuvanerilla laskentatuloksia jäi keskimäärin 18 % alle koetuloksien. Havuvanerilla vastaava ero oli noin 6 %. Koska tehdyillä kimmoarvojen redusoinnilla ei ole merkittävää vaikutusta laskettuihin jännityksiin, on jatkossa käytetty redusoiduilla arvoilla laskettuja tuloksia koekappaleiden ominaisuuksia arvioitaessa.

Taulukko 27. NISA-ohjelmistolla laskettujen taipumien vertailu koetuloksiin.

	TAIPUMA						TAIPUMA				
	koe	NISA- A	NISA-B	w-NISA/w-KOE			koe	NISA-A	NISA-B	w-NISA/w-KOE	
	mm/kN	mm/kN	mm/kN	A	B		mm/kN	mm/kN	mm/kN	A	B
K18L2K2k	0,32	0,20	0,29	0,63	0,91	K18L2K2m	0,53	0,23	0,37	0,43	0,69
H18L2K2k	0,67	0,31	0,61	0,46	0,91	H18L2K2m	0,93	0,39	0,89	0,42	0,95
K12L3K2k	0,93	0,78	0,93	0,84	1,00	K12L3K2m	1,22	0,86	1,10	0,70	0,90
H12L3K2k	1,51	1,06	1,60	0,70	1,06	H12L3K2m	2,15	1,31	2,19	0,61	1,02
K24L3K2k	0,22	0,14	0,22	0,63	0,98	K24L3K2m	0,36	0,17	0,28	0,47	0,77
K24L5K2k	0,48	0,37	0,46	0,77	0,95	K24L5K2m	0,60	0,41	0,55	0,68	0,91
K24L3K4k	0,18	0,12	0,18	0,65	0,97						
K24L5K4k	0,36	0,30	0,37	0,84	1,03						
K18L2K1k	0,35	0,26	0,35	0,74	0,99	K18L2K1m	0,59	0,29	0,42	0,49	0,71
H18L2K1k	0,68	0,39	0,68	0,58	1,01	H18L2K1m	1,14	0,48	0,96	0,42	0,84
K24L3K1k	0,25	0,18	0,25	0,71	0,99	K24L3K1m	0,39	0,21	0,32	0,54	0,83
K24L5K1k	0,57	0,50	0,58	0,88	1,02	K24L5K1m	0,71	0,55	0,68	0,77	0,95
B12L2K2k	0,64	0,56	0,70	0,88	1,10	TAIPUMA- LASKENNAN TARKKUUS		kuivat	koivu	0,75	1,00
H12L2K2k	1,32	0,79	1,30	0,60	0,99				havu	0,58	0,99
C18L2K2k	0,40	0,26	0,40	0,64	0,98				seka	0,66	0,97
B12L3K2k	0,86	0,80	0,96	0,93	1,11						
K18L3K2k	0,41	0,28	0,39	0,69	0,96			kosteat	koivu	0,58	0,82
C18L3K2k	0,53	0,36	0,50	0,68	0,96				havu	0,48	0,94

9.2. LYHYTAIKAISKOKEIDEN TULOSTEN TARKASTELU

9.2.1. Jännevälän vaikutus pistekuormitetun laatan murtolujuuteen ja leikkausmuodonmuutoksiin

Seuraavassa taulukossa on tarkasteltu jännevälän vaikutusta koevanerien jännityksiin ja taipumiin. Kappaleet on ryhmitelty pareittain siten että kunkin parin vertailukriteerinä on jänneväli, eli kussakin parissa on sama vanerityyppi, kuormitustapaus ja kosteus. Taulukon perusteella arvioitiin koevanerien murtolujuutta ja jännevälän vaikutusta NISA-ohjelmiston laskentatarkkuuteen leikkausmuodonmuutosten osalta.

Laskennallisen ja kokeellisen taipuman suhteesta huomataan, että ohjelmisto ei ota jännevälän lyhetessä lisääntyviä leikkausmuodonmuutoksia täysimääräisesti huomioon, sillä suhdeluku on kahta tapausta lukuunottamatta pitkällä jännevälillä suurempi. Kokeellisena taipuma-

na käytettiin koetuloksista voima-taipumakuvaajan lineaariselta osalta laskettua sekantin kulmakerrointa väliltä $0,1 \cdot F_{mur}-0,3 \cdot F_{mur}$. Nämä pisteet valittiin kulmakertoimen laskentaan siksi, että voima/taipumakuvaajassa oli useassa tapauksessa havaittavissa selvä taite suunnilleen kohdassa $0,3 \cdot F_{mur}-0,4 \cdot F_{mur}$, jolloin ei olisi ollut mielekästä käyttää vertailussa normaalisti kimmokertoimen laskennassa käytettyä arvoa, joka lasketaan väliltä $0,1 \cdot F_{mur}-0,4 \cdot F_{mur}$.

Murtojännityksiä ja jännitysten suhteita tarkastelemalla huomataan, että jännevälin kasvattamisella on pieni lujuutta kasvattava vaikutus kuivilla koivuvanereilla. Kostealla koivuvanerilla jännevälin kasvamisen vaikutus on päinvastainen. Havuvanerista ei tässä vertailussa voi tehdä johtopäätöksiä, sillä vaikka mukana oli kaksi havuviilupintaista vaneria, niistä lasketut jännevälin vaikutukset murtojännityksiin olivat päinvastaiset. Lisäksi arvioita sekoittaa se, että vanerin C18 poikkiviilut olivat koivua. Murtojännitysten keskimääräinen suuruus kaikissa havuviilun tapauksissa oli kuitenkin lähellä toisiaan eli 71 N/mm². Koivuvanerilla murtojännitysten hajonta oli tässä vertailussa suurempi, vaihdellen kuivemmillä koekappaleilla välillä 121-189 N/mm² ja kosteilla koekappaleilla välillä 90-115 N/mm². Jos jännityksiä verrataan Handbook of Finnish Plywood -käsikirjan sallittuihin jännityksiin, voidaan todeta, että nyt saadut arvot vastaavat melko hyvin niitä. Käsikirjan taulukkoarvot saadaan vertailukelpoisiksi kertomalla ne varmuuskertoimella 2,33, aikavaikutuskertoimella 1,75 ja homogenisoinnin huomioonottavalla likimääräisellä kertoimella 2. Näin saadaan esimerkiksi 18 mm koivulle ja havulle vertailuarvot 124,8 N/mm² ja 69,3 N/mm².

Taulukko 28. Jännevälin vaikutus koelaattojen murtojännityksiin ja NISA-ohjelman muodonmuutosten laskentatarkkuuteen.

koekappaleiden tunnuks	jänneväli mm	murto-jännitys N/mm²	laskennallisen ja kokeellisen taipuman suhde	murtojännitysten suhde
B12L2K2k	250	186	1,10	
B12L3K2k	300	189	1,11	1,02
K18L2K2k	250	127	0,91	
K18L3K2k	300	145	0,96	1,15
K24L3K2k	300	121	0,98	
K24L5K2k	500	126	0,95	1,04
K24L3K2m	300	107	0,77	
K24L5K2m	500	90	0,91	0,84
K24L3K1k	300	131	0,99	
K24L5K1k	500	127	1,02	0,97
K24L3K1m	300	115	0,83	
K24L5K1m	500	108	0,95	0,94
K24L3K4k	300	130	0,97	
K24L5K4k	500	128	1,03	0,98
H12L2K2k	250	72	0,99	
H12L3K2k	300	71	1,06	0,98
C18L2K2k	250	69	0,98	
C18L3K2k	300	73	0,96	1,06

9.2.2. Laatan paksuuden vaikutus pistekuormitetun laatan murtolujuuteen ja leikkausmuodonmuutoksiin

Taulukkoon 29 on ryhmitelty koekappaleita pareiksi paksuuden ollessa muuttujana. Taulukossa 30 on lisäksi laskettu molempien kenttien keskipisteistä kuormitettujen koelaattojen keskimääräiset murtolujuudet kullakin paksuudella. Murtojännityksistä ja niiden suhteista huomataan, että koivuvanerilla paksuuden pienentyessä lujuus kasvaa. Havuvanerilla paksuuden vaikutus murtolujuuteen on näiden kokeiden perusteella epämääräinen, sillä

taulukoista nähdään, että kuivalla havuvanerilla H18 keskimääräinen murtojännitys suurempi kuin vanerilla H12. Kosteilla koekappaleilla tilanne on päinvastainen.

Taulukko 29. Laatan paksuuden vaikutus koelaattojen murtojännityksiin ja NISA-ohjelman muodonmuutosten laskentatarkkuuteen.

koekappaleiden tunnuks	nimellis-paksuus mm	murto-jännitys N/mm ²	laskennallisen ja kokeellisen taipuman suhde	ohuemman kappaleen taipuman suhde paksumpaan	murtojännitysten suhde
K18L3K2k	18	145	0,96		
K12L3K2k	12	150	1,00	2,28	1,03
K24L3K2k	24	121	0,98		
K18L3K2k	18	145	0,96	1,82	1,20
K24L3K2k	24	121	0,98		
K12L3K2k	12	150	1,00	4,16	1,24
K24L3K2m	24	107	0,77		
K12L3K2m	12	126	0,90	3,36	1,18
H18L2K2k	18	78	0,91		
H12L2K2k	12	72	0,99	1,96	0,93
C18L3K2k	18	73	0,96		
H12L3K2k	12	71	1,06	2,88	0,98

Taulukko 30. Molemmista kentistään kuormitettujen koelaattojen keskimääräiset murtojännitykset eri paksuuksilla ja kosteustapauksissa.

Kuormitustapausten 2K keskimääräiset murtojännitykset			
Pintaviilu koivua		Pintaviilu havua	
K12, B12 kuiva	175	H12 kuiva	72
K18 kuiva	136	H18 kuiva	78
K24 kuiva	123	C18 kuiva	71
K12 kostea	126	H12 kostea	75
K18 kostea	122	H18 kostea	60
K24 kostea	98		

Koska taulukon 29 laskennallisten ja kokeellisten taipumien suhdeluvut yhtä poikkeusta lukuunottamatta ovat ohuemmilla koekappaleilla suuremmat ja lähempänä arvoa 1, voidaan tämän perusteella toistaa aikaisemmin esitetty johtopäätös siitä, että leikkausmuodonmuutosten suhteellisen osuuden kasvaessa NISA-laskennan tarkkuus pienenee.

9.2.3. Kosteuden vaikutus pistekuormitetun laatan murtolujuuteen ja leikkausmuodonmuutoksiin

Kosteuden vaikutusta arvioitaessa kappaleet ryhmiteltiin kosteuspitoisuuden perusteella pareihin kostea/kuiva. Näiden parien koe- ja laskentatulokset on koottu taulukkoon 31. Taulukosta nähdään, että koivuvanerin lujuus pienenee noin 15 % kappaleen kosteuden noustessa 11 p-%:sta 22 %:iin. Havuvanerin lujuuden aleneminen on noin 10 %. Vertailun vuoksi todettakoon, että kaavoilla (13) ja (23) laskien viulun lujuudet vastaavalla kosteusvälillä pu-

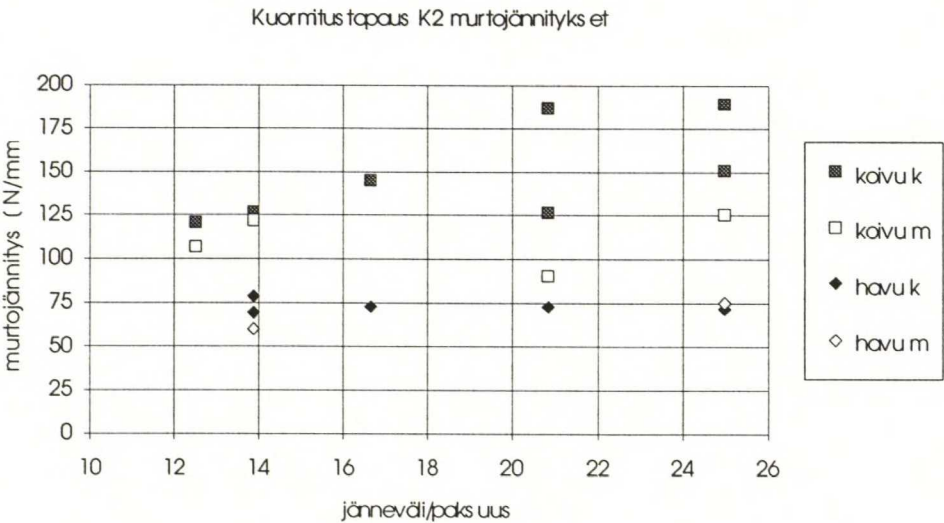
toavat koivulla 24 % ja havulla 12 %. Taipumat kasvavat sekä koivu-, että havuvanerilla puolitoistakertaisiksi.

Taulukko 31. Kosteuspitoisuuden vaikutus koelaattojen murtojännityksiin ja NISA-ohjelman muodonmuutosten laskentatarkkuuteen.

koekappaleiden tunnuks	murto-jännitys N/mm ²	laskennallisen ja kokeellisen taipuman suhde	kostean kpl:n taipuman suhde kuivaan	murto-jännitysten suhde	KOSTEA/KUIVA KESKIARVOT	
					taipuma	jännitys
K12L3K2k	150	1,00			1,47	0,85
K12L3K2m	126	0,90	1,31	0,84		
K18L2K2k	127	0,91				
K18L2K2m	122	0,69	1,68	0,96		
K24L3K2k	121	0,98				
K24L3K2m	107	0,77	1,62	0,88		
K24L5K2k	126	0,95				
K24L5K2m	90	0,91	1,25	0,71		
K18L2K1k	139	0,99				
K18L2K1m	115	0,71	1,68	0,82		
K24L3K1k	131	0,99				
K24L3K1m	115	0,83	1,53	0,88		
K24L5K1k	127	1,02			1,50	0,90
K24L5K1m	108	0,95	1,25	0,85		
H12L3K2k	71	1,06				
H12L3K2m	75	1,02	1,42	1,05		
H18L2K2k	78	0,91				
H18L2K2m	60	0,95	1,39	0,77		
H18L2K1k	125	1,01				
H18L2K1m	111	0,84	1,69	0,89		

9.2.4. Jännevälin ja paksuuden yhteisvaikutus murtolujuuteen

Kuvassa 25 on esitetty keskimääräiset murtolujuudet molemmista kentistään kuormitetuille laatoille jännevälin ja paksuuden suhteen funktiona. Suhteen L/t kasvaessa kuivan koivu- vanerin lujuudessa on havaittavissa selvä kasvava trendi. Muissa tapauksissa murtolujuus pysyy lähes vakiona suhteen L/t vaihdellessa.



Kuva 25. Jännevälin ja paksuuden yhteisvaikutus pistekuormitettujen vanerilaattojen murtolujuuksiin.

9.2.5. Kuormitustapauksen vaikutus murtolujuuksiin ja leikkausmuodonmuutoksiin

Kuormien sijainnin vaikutusta murtolujuuksiin tarkasteltiin ryhmittelemällä koekappaleiden tulokset pareittain kuormitustapauksiin 2K ja 1K. Parit on esitetty taulukossa 32. Koivu- vanerin tapauksessa huomataan, että murtokuorma yhtä tapausta lukuunottamatta oli suurem- pi kuormitustapauksella 2K, eli molemmista kentistään kuormitetuilla laatalla. Tästä huoli- matta koekappaleiden murtojännitykset kasvoivat suuremmiksi tapauksilla 1K. Tämän voi- daan ajatella johtuvan siitä, että rakenteen taipumat kasvavat toispuolisesti kuormitetulla laatalla suuremmiksi kuin vastaavalla molemmista kentistään kuormitetulla laatalla, jolloin rakenteesta tulee riippurakenne.

Taulukko 32. Kuormitustavan vaikutus murtolujuuksiin ja taipumiin.

kappaleiden tunnuks	KOETULOS		NISA			murto- jännitys N/mm²	wN/wkoe B	K1:n suhde K2:een	
	F-murto kN	w mm/kN	w mm/kN	QX N/mm²	QK1/QK2			w	murto- jännitys
K18L2K2k	18,07	0,32	0,29	-6,06		127	0,91		
K18L2K1k	17,22	0,35	0,35	-5,59	0,92	139	0,99	1,11	1,10
K24L3K2k	25,30	0,22	0,22	-5,76		121	0,98		
K24L3K1k	24,01	0,25	0,25	-5,39	0,94	131	0,99	1,13	1,08
K24L5K2k	21,08	0,48	0,46	-5,49		126	0,95		
K24L5K1k	18,82	0,57	0,58	-5,26	0,96	127	1,02	1,18	1,01
K18L2K2m	19,22	0,53	0,37	-6,02		122	0,69		
K18L2K1m	15,73	0,59	0,42	-5,56	0,92	115	0,71	1,11	0,94
K24L3K2m	24,48	0,36	0,28	-5,73		107	0,77		
K24L3K1m	23,10	0,39	0,32	-5,37	0,94	115	0,83	1,06	1,08
K24L5K2m	16,58	0,60	0,55	-5,49		90	0,91		
K24L5K1m	17,59	0,71	0,68	-5,25	0,96	108	0,95	1,18	1,20
H18L2K2k	9,58	0,67	0,61	-5,77		78	0,91		
H18L2K1k	13,34	0,68	0,68	-5,37	0,93	125	1,01	1,01	1,60
H18L2K2m	7,80	0,93	0,89	-6,02		60	0,95		
H18L2K1m	12,62	1,14	0,96	-5,37	0,89	111	0,84	1,22	1,85

Havuvanerilla suurista muodonmuutoksista johtuva ero oli vielä selvempi. Lisäksi vanerin H18L2 tapauksessa tapahtui selvää painimen leimautumista ja laatan lävistymistä, mikä osaltaan vaikeuttaa taivutusjännitysten arviointia.

Laskennallisen taipuman suhde kokeissa mitattuihin taipumiin kasvoi ja lähestyi arvoa yksi, kun kuormitustapa muuttui molemmista kentistä kuormitetusta epäsymmetriseen kuormitus- tapaan. Leikkausvoimia tarkasteltaessa huomataan että ne pienenevät, kun muut muuttujat pysyvät samoina ja kuormitustapaus muuttuu tapauksesta K2 tapaukseen K1. Leikkausvoi- man pieneminen aiheuttaa NISA-laskennan tarkkuuden paranemisen muodonmuutosten osalta, mihin on kiinnitetty huomiota jo aikaisemmissakin vertailuissa.

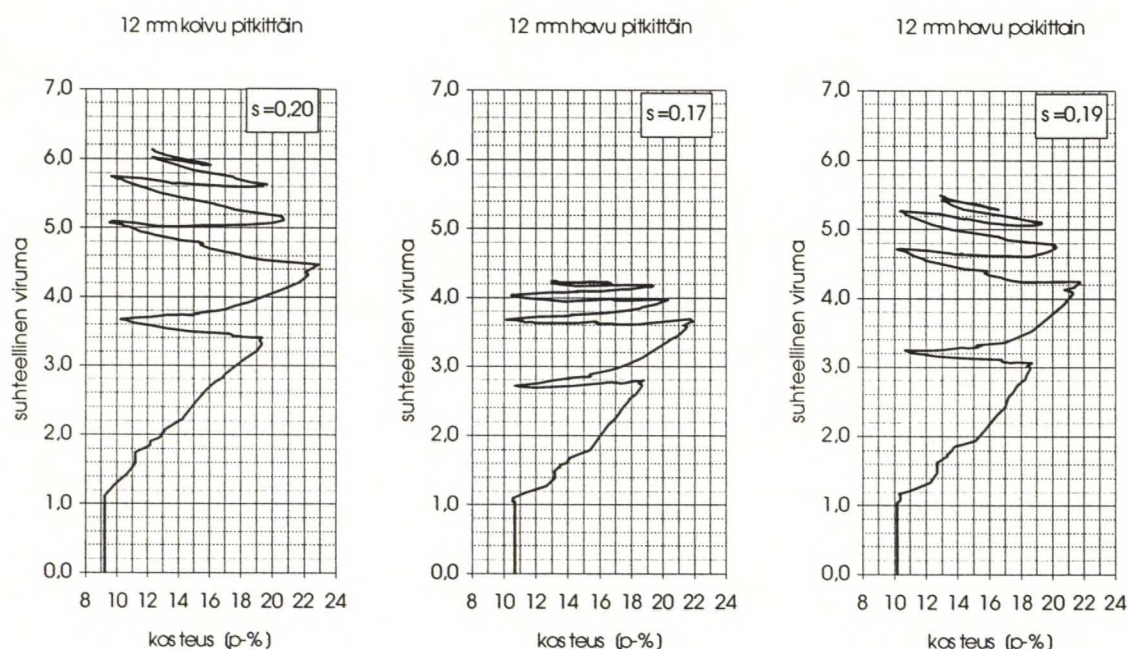
9.3. PITKÄAIKAISKOKEET

9.3.1. Suhteellinen viruma kosteuspitoisuuden funktiona

Selvemmän kuvan vanerin kosteuspitoisuuden vaikutuksesta suhteelliseen virumaan saa tar- kastelemalla sitä kosteuspitoisuuden funktiona. Kuvassa 26 ja 27 on esitetty koekappaleiden

suhteelliset virumat kosteuspitoisuus vaak akselina. Koekappaleiden pintaviilu oli jännevälin suuntainen, paitsi havuvanerin nelipistetaivutuksessa, missä se kuormitettiin sekä pituussuuntaan että poikittain.

Kuvaajista nähdään kaikkien koekappaleiden voimakas viruminen kahdella ensimmäisellä kostutusjaksolla. Ensimmäisen jakson viruminen oli voimakasta heti alusta alkaen, mikä sopii hyvin yhteen Ranta-Maunuksen /14/ virumamallien kanssa. Toisen kostutusjakson viruma oli aluksi hitaampaa, mutta kiihtyi sitten kun edellisen kostutusjakson maksimi-arvo saavutettiin. Toisen kostutusjakson aikana saavutettu kosteuspitoisuus jäi tämän kokeen maksimikosteudeksi.



Kuva 26. Nelipistetaivutettujen koekappaleiden suhteellinen viruma keskimääräisen kosteuspitoisuuden funktiona.

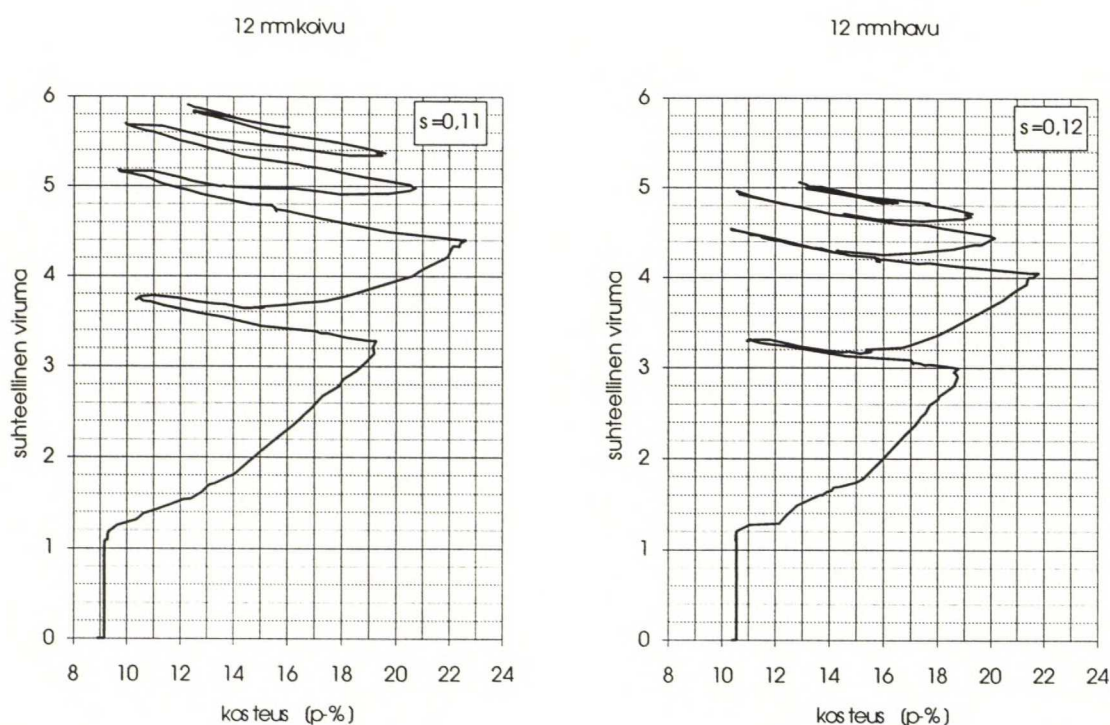
Koivuvanerin viruminen sekä laatta- että nelipistekokeessa oli hyvin samanlaista. Ensimmäisten kostutusjaksojen jälkeen kappaleet viruivat kappaleiden kuivuessa ja palautuivat niiden kostuessa. Nelipistekuormituksessa palautuminen oli kuitenkin selvempää. Palkki-koekappaleiden voimakas viruman vaihtelu näkyy selvemmin kuvissa 21 ja 22. Koivuvanerin viruma tässä kokeessa sopii hyvin yhteen aikaisempien tutkimustulosten kanssa.

Havuvanerilla havaittiin selvä ero nelipistekokeen virumissa riippuen siitä oliko kappaleet kuormitettu pituussuuntaan vai poikkisuuntaan. Pituussuuntaan kuormitetun kappaleen viruma lisääntyi kostutusjaksoilla ja väheni tai pysyi ennallaan kuivatusjaksoilla. Viruman lisääntyminen oli kuitenkin hyvin pientä, joten voidaan sanoa kappaleiden noudattaneen maksimimallia. Poikittain kuormitetun havuvanerin viruma puolestaan oli lähempänä kumulatiivista mallia, eli niiden viruma oli samanlaista kuin koivuvanerilla joskin 10-20 % pienempää.

Havuvanerilaatan käyttäytyminen poikkesi Ranta-Maunuksen esittämästä maksimimallista. Viruma oli ajanhetkeen 260 vrk asti likimain maksimimallin mukaista, mutta tämän jälkeen

kappaleiden käyttäytyminen oli pikemminkin kumulatiivisen mallin mukaista. Tämä näkyy selvästi kuvasta 20. Voidaankin sanoa, että maksimimalli on kumulatiivisen mallin erikoistapaus, missä saavutetun maksimikosteuden alapuolella tapahtuvaa viruman vaihtelua kuvaavat termit ovat nollia. Kuvasta 20 huomataan lisäksi kentän VIRH2A muista kentistä poikkeava käyttäytyminen. Kentän keskipisteen viruman vaihtelu on hyvin voimakasta, mutta kokonaisviruma kuitenkin pysyy samoissa rajoissa kuin muillakin kentillä. Tämä voi johtua laatan yläpinnalla lähellä kentän keskiviivaa olleista oksista tai jostain muusta havu-
vanerissa esiintyvistä rakennevirheistä.

Kaikkien koekappaleiden kokonaisviruman muutos yhden täyden syklin aikana selvästi vähenee syklien lukumäärän kasvaessa. Yhden kostutus/kuivatusjakson kokonaisvaikutus lähenee nollaa, jolloin myös kokonaisvirumalla on jokin raja-arvo, jota voidaan nimittää esimerkiksi virumarajaksi. Näissä kokeissa, missä viimeisten syklien RH vaihteli välillä 60...80 eli maksimi- ja minimiarvojen sisäpuolella, tämä raja saavutettiin kaikilla koekappaleilla. Kuvista kuitenkin nähdään, että aikaisemmillä sykleillä kappaleiden kosteuden ylittäessä n. 16 p-% kokonaisviruma lisääntyy, koska kuivumisen aikana tapahtuva viruman kasvu on lähes lineaarista koko kosteuden vaihteluvälillä, kun taas kostumisen aikana viruma kääntyy jopa palautumisesta nousuun noin 16 p-%:n kohdalla. Näin ollen on odotettavissa, että viruma lisääntyy, mikäli kappaleiden kosteuspitoisuus nousee uudelleen yli tämän rajan.



Kuva 27. Pistekuormitettujen laattojen suhteellinen viruma kappaleiden keskimääräisen kosteuspitoisuuden funktiona.

10. VIRUMAMALLIN KEHITTÄMINEN

10.1. LÄHTÖKOHDAT

Kaavojen (60) ja (65) mukaan taipuma ja viruma voidaan jakaa kahteen osaan, taivutusmomentin ja leikkausvoimien aiheuttamiin muodonmuutoksiin. Koska leikkausmuodonmuutosten käsittely erillään taivutuksesta on hankalaa, on tässä yhdistetty leikkauksen aiheuttama viruma taivutusviruman malliin. Nelipistetaivutetuille palkeille voidaan määrittää taivutusmomentin aiheuttamat taipumat ja suhteellinen taivutusviruma keskialueen taipumasta. Kaavan (60) perusteella suhteellisen viruman lausekkeeksi saadaan:

$$\frac{w(t)}{w(0)} = \frac{w_Q(t) + w_M(t)}{w(0)} \quad (79)$$

Kaavan (74) termi $w_Q(t)$ voidaan merkitä kokonaistaipuman avulla seuraavasti:

$$w_Q(t) = \frac{w_Q(t)}{w(t)} w(t) = q(t) w(t) \quad (80)$$

missä $q(t)$ on leikkausmuodonmuutosten suhteellinen osuus kokonaistaipumasta ajanhetkellä t

Lausumalla leikkausmuodonmuutosten aiheuttama taipuma kertoimen $q(t)$ ja kokonaistaipuman avulla, voidaan kokonaistaipumalle johtaa lauseke momentista aiheutuvaa taipumaa käyttäen:

$$\begin{aligned} w(t) &= q(t)w(t) + w_M(t) \\ \Leftrightarrow w(t) &= \frac{w_M(t)}{1-q(t)} = \frac{w_M(t)}{m(t)} \end{aligned} \quad (81)$$

missä $m(t)$ on taivutusmomentin aiheuttamien muodonmuutosten suhteellinen osuus kokonaistaipumasta

Koska $w(0) = m(0) \cdot w(0)$, voidaan suhteellinen viruma kirjoittaa kaavan (65) perusteella muotoon:

$$\frac{w(t)}{w(0)} = \frac{w_M(t)}{m(t) \cdot w(0)} = \frac{m(0)}{m(t)} EJ_M(t) \quad (82)$$

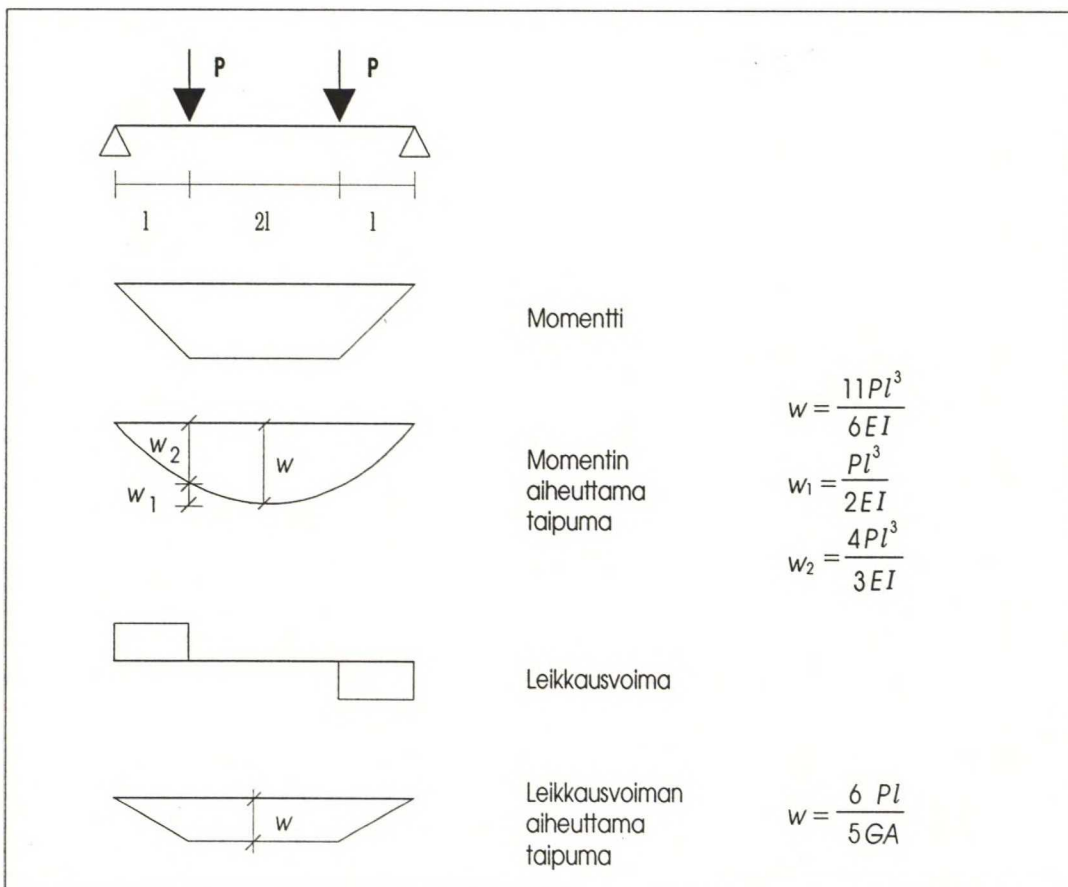
Seuraavassa on johdettu nelipistetaivutuskokeesta mitattujen taipumien avulla suureille $m(t)$ ja $q(t)$ vanerin kosteuspitoisuudesta riippuvat arvot ja yhdistetty ne kumulatiivisen mallin mukaiseen taivutusvirumaan.

10.2. NELIPISTETAIVUTUS

10.2.1. Neljännespisteistään kuormitettu palkki

Neljännespisteistään taivutetun palkin taipuma voidaan jakaa kuvan 28 mukaisiin momentin ja leikkausvoiman aiheuttamiin taipumiin. Niiden yhteisvaikutus palkin taipumaan voidaan esittää kaavalla (83). Leikkausmuodonmuutosten osuus palkin taipumasta saadaan tarkastelemalla sulkulausekkeen jälkimmäisen termin arvoa.

$$w_M + w_Q = \frac{11 \cdot Pl^3}{6 \cdot EI} \left(1 + \frac{36 \cdot EI}{55 \cdot GA l^2}\right) = \frac{11 \cdot Pl^3}{6 \cdot EI} \left(1 + \frac{3 \cdot h^2 E}{55 \cdot l^2 G}\right) \quad (83)$$



Kuva 28. Neljännespisteistä kuormitetun homogeenisen palkin momentti- ja leikkausvoimakuviot, sekä momentin ja leikkauksen aiheuttamat taipumat palkin keskialueella.

10.2.2. Koekappaleiden leikkausmuodonmuutosten riippuvuus kosteuspitoisuudesta

Leikkausmuodonmuutosten osuutta nelipistetaivutettujen koekappaleiden taipumaan arvioitiin laskemalla taipumamittauksista keskipisteen ja kuormituspisteiden taipumien välisiä suhteita. Jos neljännespisteistään kuormitetun palkin taipuma lasketaan ottamalla huomioon

vain taivutusmomentti, on palkin taipumien suhde $w_1/w_2/w = 3/8/11$ (kuva 28). Kun lisäksi oletetaan, että keskialueen muodonmuutokset johtuvat ainoastaan taivutusmomentista ja reuna-alueilla muodonmuutoksiin vaikuttaa taivutusmomentin lisäksi leikkausvoima, voidaan arvioida vanerista valmistettujen nelipistetaivutettujen koekappaleiden leikkausmuodonmuutosten osuus kunakin kuormituskokeen ajanhetkenä seuraavasti:

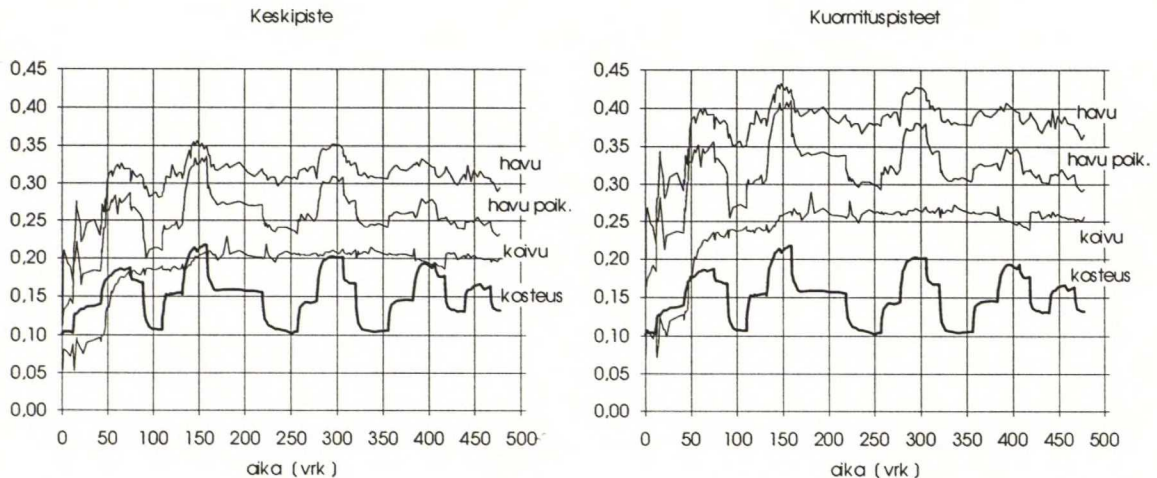
Keskipisteen taipuman leikkausmuodonmuutosten suhteellinen osuus:

$$q = \frac{a-1}{a} \quad \text{missä} \quad a = \frac{3 \cdot w_{mit}}{11 \cdot w_{1mit}} \quad (84)$$

ja kuormituspisteiden taipumien leikkausmuodonmuutosten osuus

$$q = \frac{b-1}{b} \quad \text{missä} \quad b = \frac{3 \cdot w_{2mit}}{8 \cdot w_{1mit}} \quad (85)$$

Alaindeksillä mit merkityt taipumat on kokeen aikana koekappaleista mitattuja taipumia. Kuvassa 29 on esitetty neljännespisteistään kuormitettujen 12 mm paksujen koekappaleiden kaavoilla (84) ja (85) lasketut leikkausmuodonmuutosten osuus taipumasta kokeen aikana. Edellä esitetyllä tavalla laskettu arvo ei ole pelkästään leikkausmuodonmuutosten osuus, vaan se ottaa huomioon kimmo- ja liukukertoimien muutoksien lisäksi myös kosteusmuodonmuutosten aiheuttamat pakkovoimat, sekä leikkausviruman. Tässä ko. arvoa kuitenkin nimitetään leikkausmuodonmuutosten osuudeksi.



Kuva 29. Koekappaleiden arvioitu kosteussuhde ja leikkausmuodonmuutosten osuus taipumasta nelipistetaivutetuilla koekappaleilla.

Kuvasta huomataan että leikkausmuodonmuutosten osuus kasvaa voimakkaasti kaikilla koekappaleilla ensimmäisen kostutusjakson aikana. Ensimmäisen kostutuksen jälkeen leikkausmuodonmuutosten osuus pysyi koivuvanerilla lähes vakiona ja havulla se vaihteli kosteuspitoisuuden mukaan pienentyen kuivatusjaksoilla ja kasvaen kostutuksessa.

Taulukossa 33 on vertailtu kaavalla (83) laskettujen taipumien ja leikkausmuodonmuutosten osuutta koekappaleista mitattuihin taipumiin ja kaavalla (84) laskettuihin leikkausmuodonmuutosten osuuksiin. Arvot on laskettu ajanhetkellä $t=0$ ja $t=75$ vrk, jolloin vastaavat kosteuspitoisuudet olivat noin 10 % ja 19 %. Kaavalla (83) laskettaessa kimmokertoimina on käytetty RIL 120 mukaisesti laskettuja arvoja kosteusluokissa 1 ja 3. Liukukertoimen perusarvona käytettiin SFS-standardissa annettuja tasoliukukertoimen arvoja, joita redusoitiin kosteuteen 19 % jakamalla ne arvolla 1,2. Taipumien laskennassa on ajan vaikutus otettu huomioon suunnitteluohjeen RIL 120 aikavaikutuskertoimilla.

Taulukosta nähdään, että liukukertoimille tehty kosteusreduktio on liian pieni, sillä kosteiden koekappaleiden leikkauksesta johtuvan taipuman osuus on selvästi pienempi kuin mitattu osuus. Kuivilla koekappaleilla taas lasketut leikkausmuodonmuutosten osuudet ovat suurempia kuin mitatut. Koska laskennallinen taipuma kuitenkin jää pienemmäksi, voidaan tästä päätellä, että laskennassa käytetyt kimmokertoimien arvot ovat liian suuria.

Taulukko 33. Esimerkki 12 mm koivu- ja havuvanerin teoreettisista taipumista sekä leikkausmuodonmuutosten osuudesta.

	E: RIL 120 kosteusluokat 1 ja 3. G: liukukerroin SFS-standardit			Laskennalliset taipumat. Aikavaikutus RIL 120 mukaisilla kertoimilla.		Mitatut taipumat.		
vanerityyppi ja kosteus	P N	E N/mm ²	G N/mm ²	w mm	q-os	q-os mit	w-mit mm	Huom!
koivu u=10 %	220,5	11594	110	1,67	12,83%	3,95%	2,4	alkutaipuma aikalk. C
havu u=10 %	127,5	8920	45	1,40	21,68%	12,82%	1,4	
havu p. u=10 %	70,1	4280	45	1,42	11,72%	13,24%	1,9	
koivu u=19 %	220,5	9610	92	4,71	12,73%	18,37%	8,2	taipuma 75 vrk aikalk A.
havu u=19 %	127,5	6812	38	4,19	20,02%	31,94%	4,0	
havu p. u=19 %	70,1	3268	38	4,30	10,72%	28,76%	5,8	

Käyttämällä teoreettisen taipuman laskennassa RIL 120 aikavaikutuskertoimien sijasta Handookin of Finnish Plywood -käsikirjan mukaisia aikavaikutuskertoimia, päästäisiin kosteammilla kappaleilla hieman lähemmäksi todellisia taipumia, sillä käsikirjan korjauskertoimet liukukertoimille ovat pienempiä kuin kimmokertoimille. Lisäksi käsikirjan aikavaikutuskertoimet pienenevät vielä 1 vuoden jälkeen, kun RIL 120 pisimmän aikaluokan raja on 1,5 kk, eli suunnitteluohjeen mukaan laskettaessa taipumat eivät enää muuttuisi taulukon arvoista. Mitatut taipumat esim. 450 vrk:n kohdalla olivat koivulla jo 14,3 mm ja havulla 6,0 mm.

10.2.3. Leikkausmuodonmuutosten empiirinen malli

Koska puuviilulevyjen pitkäaikaiskuormituksen muodonmuutoksiin vaikuttaa jatkuvasti kosteuspitoisuuden mukana muuttuvien kimmo- ja liukukertoimien lisäksi myös kappaleen kostumisesta ja kuivumisesta aiheutuvat sisäiset pakkovoimat, pyrittiin leikkausmuodonmuutosten osuudelle hakemaan kosteuspitoisuudesta riippuva yhteys. Tämä tehtiin tarkastelemalla leikkausmuodonmuutosten osuutta kosteuspitoisuuden funktiona. Palkkikoekappaleiden taipumista kaavalla (84) lasketut keskipisteiden leikkausosuudet piirrettiin kuvaajaan, jonka vaaka-akselilla on kosteussuhde ja pystyakselilla leikkausmuodonmuutosten osuus. Näiden kuvaajien avulla määritettiin leikkausmuodonmuutosten osuuksille kosteusriippuvuuskaavat.

Jos kappaleissa ei tapahtuisi virumista, leikkausmuodonmuutosten osuuden voisi olettaa pienenevän saman verran kappaleen kuivuessa kuin ne lisääntyivät kostutuksessa. Leikkausosuuden kuvaajana olisi tässä tapauksessa ainoastaan yksi käyrä. Näin ei kuitenkaan ole, vaan havaitaan, että leikkausmuodonmuutokset pienenevät kappaleen kuivuessa vähemmän kuin ne kostuessa lisääntyivät. Tämän perusteella voidaan sanoa että pelkästään kimmo- ja liukukertoimien perusteella ei voida arvioida leikkausmuodonmuutosten osuutta pitkäaikaiskuormituksessa ja vaihtuvissa kosteusolosuhteissa.

Kuviin 30 ja 31 piirretyistä pistejoukoista nähdään, että ne noudattavat likimain suoran yhtälöä. Suorien kulmakerroin riippuu näiden kuvaajien perusteella kosteushistoriasta siten, että ensimmäisen kostutusjakson jälkeen palautuminen tapahtuu loivempaa suoraa pitkin. Tämän jälkeen leikkausosuus vaihtelee tätä suoraa pitkin, kunnes ylitetään aikaisempi kosteusmaksimi. Kosteusmaksimin ylittymisen jälkeen leikkausmuodonmuutosten kasvu siirtyy ensimmäiselle suoralle, josta palautuminen jälleen tapahtuu loivempaa suoraa pitkin. Näiden maksimien alapuolella olevien suorien kulmakerroin on sama, mutta niiden taso riippuu siis saavutetuista kosteuden maksimiarvoista.

Koivuvanerilla maksimikosteuden alapuolella tapahtuva kosteusvaihtelu ei aiheuta leikkausmuodonmuutosten merkittävää vaihtelua, eli kuvaajan kulmakerroin on saavutettujen maksimikosteuksien jälkeen lähes nolla.

Havuvanerilla leikkausmuodonmuutosten suhteellisessa osuudessa tapahtuu selvää vaihtelua. Tämä vaihtelu on likimain lineaarista, kunnes kosteuspitoisuus nousee yli aikaisemman maksimikosteuden. ja leikkausmuodonmuutosten osuus kasvaa noudattaen ensimmäistä suoraa. Uuden maksimiaron jälkeen vaihtelu tapahtuu suoraa pitkin, jonka kulmakerroin on sama kuin edellisen vaihtelusuoran, mutta taso on ylempänä.

Tähän etsityt riippuvuudet pätevät siis nyt mukana olleille vanerirakenteille ja kuormitusasteille sekä alkukosteuksille. Leikkausmuodonmuutosten osuus määritettiin tässä tutkimuksessa olleiden koekappaleiden lisäksi myös J. Rekosen marraskuussa 1993 aloittaman virumakokeen kahdelle erilaiselle 18 mm koivuvanereille. Toinen näistä oli normaalirakenne, pintaviilun suhteen pituussuuntaan taivutettu vaneri ja toinen erikoisrakenne vaneri. Erikoisvanerin rakenne oli suunnattu siten, että kolme päällekkäistä viilua on aina samaan suuntaan, eli vanerin rakenne on AABBBAAABBBAA. Myös tämä vaneri on kuormitettu pintaviilun suhteen pituussuuntaan.

Seuraavassa on esitetty kuvaajien perusteella etsityt leikkausmuodonmuutosten osuuden kosteusriippuvuuden empiiriset kaavat. Nämä kaavat pätevät siis nyt koestetuille vanerityypeille ja olosuhteille, sekä kuormitustavalle. Suorien sijaintiin ja kulmakertoimiin vaikuttaa kosteuspitoisuuden vaihtelun lisäksi myös kappaleiden alkukosteus, joka näissä tapauksissa oli noin 10 %. Kokeista mitatut ja mittausten perusteella määritellyillä kaavoilla (86)-(90) lasketut leikkausmuodonmuutosten osuudet on esitetty kuvissa 30 ja 31.

Nelipistetaivutettujen 12 mm koevanerien leikkausmuodonmuutosten suhteelliseksi osuudeksi kokonaistaipumasta saatiin mittaustulosten perusteella seuraavat kosteusriippuvuudet:

12 mm koivuvaneri, kuormitussuunta pintaviilun syyn suuntaan, kuormitusaste $s=0,20$:

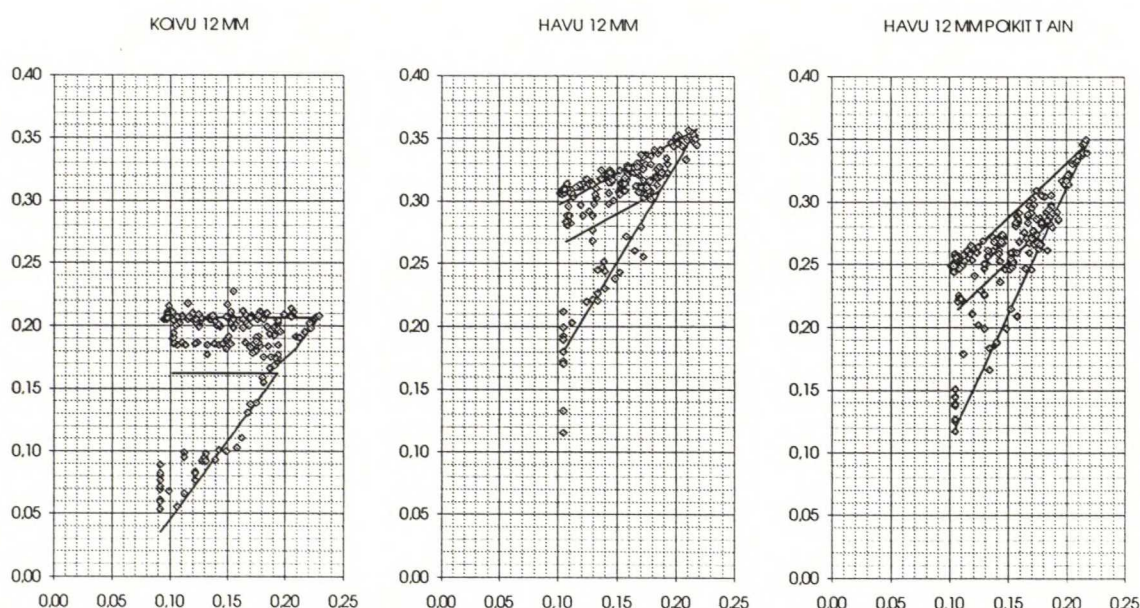
$$q(t) = \begin{cases} 1,25 \cdot u(t) - 0,08 & \text{kun } u(t) = u_{\max} \\ 1,25 \cdot u_{\max} - 0,08 & \text{kun } u(t) \leq u_{\max} \end{cases} \quad (86)$$

12 mm havuvaneri, kuormitussuunta pintaviilun syyn suuntaan, kuormitusaste $s=0,17$

$$q(t) = \begin{cases} 1,57 \cdot u(t) + 0,015 & \text{kun } u(t) = u_{\max} \\ 0,52 \cdot u(t) + 1,05 \cdot u_{\max} + 0,015 & \text{kun } u(t) < u_{\max} \end{cases} \quad (87)$$

12 mm havuvaneri, kuormitussuunta pintaviilun syyn suhteen poikittain, kuormitusaste $s=0,19$:

$$q(t) = \begin{cases} 2 \cdot u(t) - 0,09 & \text{kun } u(t) = u_{\max} \\ 0,875 \cdot u(t) + 1,125 \cdot u_{\max} - 0,09 & \text{kun } u(t) < u_{\max} \end{cases} \quad (88)$$



Kuva 30. Nelipistetaivutettujen 12 mm koevanerien mittausten perusteella lasketut ja kaavoilla 86-88 lasketut leikkausmuodonmuutosten osuudet keskipisteen taipumasta kosteuspitoisuuden funktiona.

Kokeissa olleilla 12 mm vanereilla nähdään selvästi leikkausosuuksien pisteiden asettuvan kolmelle suoralle, joista jyrkin kuvaa leikkausmuodonmuutosten osuuden kasvua aikaisemman kosteuspitoisuuden ylityksen jälkeen. Maksimien jälkeisistä lasketuista suorista alempi jää hieman mitattujen pisteiden alapuolelle, mutta tästä voidaan osa selittää ilmastointikoneen käyntihäiriöllä, jonka aikana kappaleiden kosteuspitoisuus todennäköisesti kävi korkeammalla kuin mittauksissa on todettu. Tämä käyntihäiriö osui ensimmäisen kostutusjakson loppupuolelle ja sen aikana säähuoneen suhteellinen kosteus kävi noin 7-8 %-yksikköä

korkeammalla kuin jakson keskimääräinen kosteus (kuva 18). Tältä ajalta ei ole käytettävissä kappaleiden kosteusmittaustuloksia.

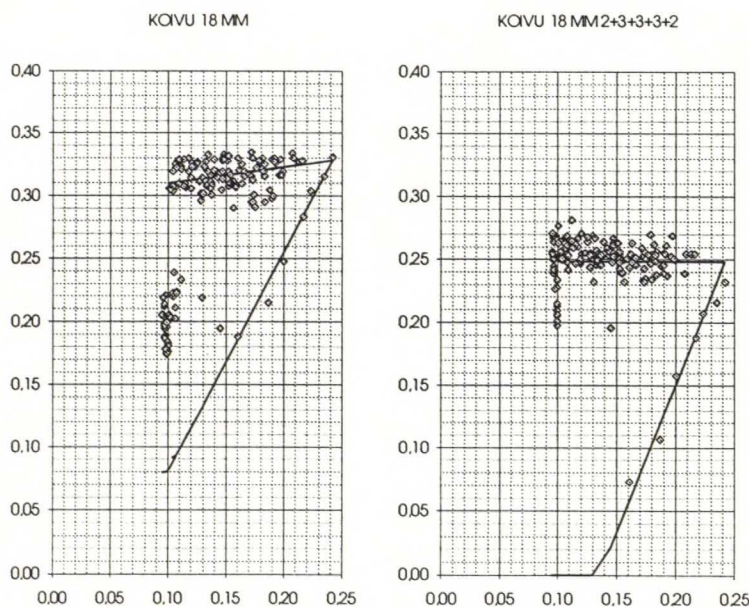
18 mm koivuvanerien leikkausmuodonmuutosten osuudelle saatiin seuraavat kosteusriippuvuudet:

18 mm normaali koivuvaneri, kuormitusasuunta pintaviilun syyn suuntaan, kuormitusaste $s=0,25$:

$$q(t) = \begin{cases} 1,75 \cdot u(t) - 0,095 & \text{kun } u(t) = u_{\max} \\ 0,13 \cdot u(t) + 1,62 \cdot u_{\max} - 0,095 & \text{kun } u(t) < u_{\max} \end{cases} \quad (89)$$

18 mm erikoiskoivuvaneri, suunnattu viilurakenne ABBBBAAABBBAA, kuormitusasuunta pintaviilun syyn suuntaan, kuormitusaste $s=0,25$:

$$q(t) = \begin{cases} 2,35 \cdot u(t) - 0,32 & \text{kun } u(t) = u_{\max} \\ 2,35 \cdot u_{\max} - 0,32 & \text{kun } u(t) < u_{\max} \end{cases} \quad (90)$$



Kuva 31. Nelipistetaivutettujen 18 mm koivuvanerien mittausten perusteella lasketut ja kaavoilla 84 ja 85 lasketut leikkausmuodonmuutosten osuudet keskipisteen taipumasta kosteuspitoisuuden funktiona.

18 mm erikoisvanerin rakenteesta päätellen voisi olettaa, että leikkausmuodonmuutosten osuus on sillä pienempi kuin normaalirakenteisella vastaavan paksuisella vanerilla. Tämä oletus perustuu siihen, että erikoisvanerin kolme keskimäistä viilua on pituussuuntaan ja taivutusjäykkyys on hieman suurempi kuin normaalirakenteisella vanerilla. E :n ja G :n suhde näillä vanereilla laskettuna kuivalle kappaleelle oli 11213/222 erikoisvanerilla ja 10473/222

normaalivanerilla. Oletus osoittautui paikkansapitäväksi, sillä erikoisvanerin leikkausmuodonmuutosten osuus kokonaistaipumasta oli noin 25 %:iin kun se normaalivanerilla oli noin 32 %. 18 mm erikoisvanerille lasketussa leikkausmuodonmuutosten osuudessa oli myös erittäin suuri hajonta, sillä toisella koekappaleella se oli noin 0,33 ja toisella noin 0,19. Tässä esitettyihin kuviin on laskettu rinnakkaiskoekappaleiden keskiarvo kullakin kosteuspitoisuuden arvolla.

Kuvassa 31, 18 mm vanereiden kuvaajissa, esiintyvä mitattujen pisteiden ryhmän sijainti kosteussuhteen 0,1 ja leikkausosuuden n. 0,2 kohdalla selittyy suurehkoilla kuormitusasteella ja suurikokoisella koepainolla. Suuren painon sijoittaminen tällä koejärjestelyllä on vaikeaa ilman että alussa tapahtuu "nykäystä", eli alkutaipuma on liian suuri teoreettiseen taipumaan nähden. Tästä alkutaipumasta voidaan olettaa suuren osan johtuvan leikkausmuodonmuutoksista, sillä leikkausvoima on suuri momenttiin verrattuna. Leikkausmuodonmuutosten osuus kuitenkin siirtyy lasketulle suoralle kun kappaleen kosteuspitoisuus lähtee nousuun, eli kosteuspitoisuuden kasvu tavallaan palauttaa alussa tapahtuneet leikkausmuodonmuutokset. Kuormituksen äkillinen kasvu vaikuttaa myös momentin aiheuttamaan taipumaan, mutta sen aiheuttama lisäys ei ole yhtä merkittävä kuin leikkauksen aiheuttama taipuman lisäys. Esitettyihin kaavoihin on tässä tapauksessa suhtauduttava varauksella, erityisesti kaavan alkuosaan eli ensimmäisen kostutuksen leikkausmuodonmuutosten osuuteen.

10.2.4. Koekappaleiden suhteellinen viruma ja leikkausmuodonmuutosten osuuden yhdistäminen taiputusviruman virumamalliin

Kaavoilla (86)-(90) laskettuja leikkausmuodonmuutosten osuuksia käyttäen muodostettiin kappaleiden keskipisteiden suhteelliselle kokonaisvirumalle malli. Mallin perusyhtälönä käytettiin Ranta-Maunuksen /14/ kumulatiivista mallia, jonka termit a^- , a^+ ja a^{++} sovitettiin vastaamaan kutakin tapausta. Virumayhtälön muut termit pidettiin Ranta-Maunuksen esittämän suuruisina.

Sovitus tehtiin vertaamalla koekappaleen keskialueen suhteellista virumaa mallin mukaiseen taiputusvirumaan. Tässä siis oletettiin, että kappaleiden keskialueella tapahtuu vain taiputusvirumaa. Termit määritettiin siten että mitatun virumakäyrän ja mallin mukaisen käyrän muoto vastasivat mahdollisimman hyvin toisiaan. Keskialueen, eli suhteellisena taiputusvirumana käytettiin kahden rinnakkaiskoekappaleen keskiarvoa.

Keskipisteen suhteelliselle kokonaisvirumalle muodostettiin malli kertomalla kumulatiivisen viruman yhtälö (70) luvulla $m(0)/m(t)$, missä $m(t)=1-q(t)$. Arvot $q(t)$ laskettiin kosteuden funktiona kaavoilla (86)-(90). Edellä johdetun yhtälön (82) mukaisesti virumamalli saa siis muodon:

$$\frac{\varepsilon(t)}{\varepsilon(0)} = \frac{m(0)}{m(t)} \left(1 + A_0 t + \sum_{i=1}^N A_i (1 - e^{-a_i t}) + \int_0^t K \sigma du(\tau) \right) \quad (91)$$

Alkunykäyksen aiheuttama virhe korjattiin nelipistetaivutettujen koekappaleiden tapauksessa sijoittamalla $m(0)$:n paikalle kaavan (84) avulla laskettu todellinen taivutusmomentin osuus ajanhetkellä $t=0$. Näin mallin antamat keskipisteen suhteellisen viruman arvot saatiin vastaamaan mitattuja suhteellisia virumia, missä $w(0)$ on teoreettisia arvoja suurempi. Tämän käytännön perusteena on edellä mainittu leikkaus- ja taivutusosuuksien palautuminen teoreettiselle tasolle ensimmäisen kosteudenmuutoksen alkaessa. Koska laattojen tapauksessa $m(0)$ ei voitu määrittää mittausten perusteella, niiden mallissa käytettiin kaavojen (86) ja (87) avulla laskettuja arvoja.

Taulukoon 34 on koottu nelipistetaivutuskokeen keskialueen taipuman perusteella määritetyt a^+ , a^- , ja a^{++} -arvot koevanereille. Havuvanerista on huomattava, että Ranta-Maunuksen mukaan havuvanerin taivutus noudattaa maksimimallia. Leikkausvirumalle, joka Ranta-Maunuksen mukaan noudattaa molemmilla vanereilla maksimimallia ei yritetty etsiä arvoja b , vaan leikkausviruma on tässä yhdistetty edellä selostetulla tavalla kumulatiiviseen malliin kertoimien $q(t)$ ja $m(t)$ avulla.

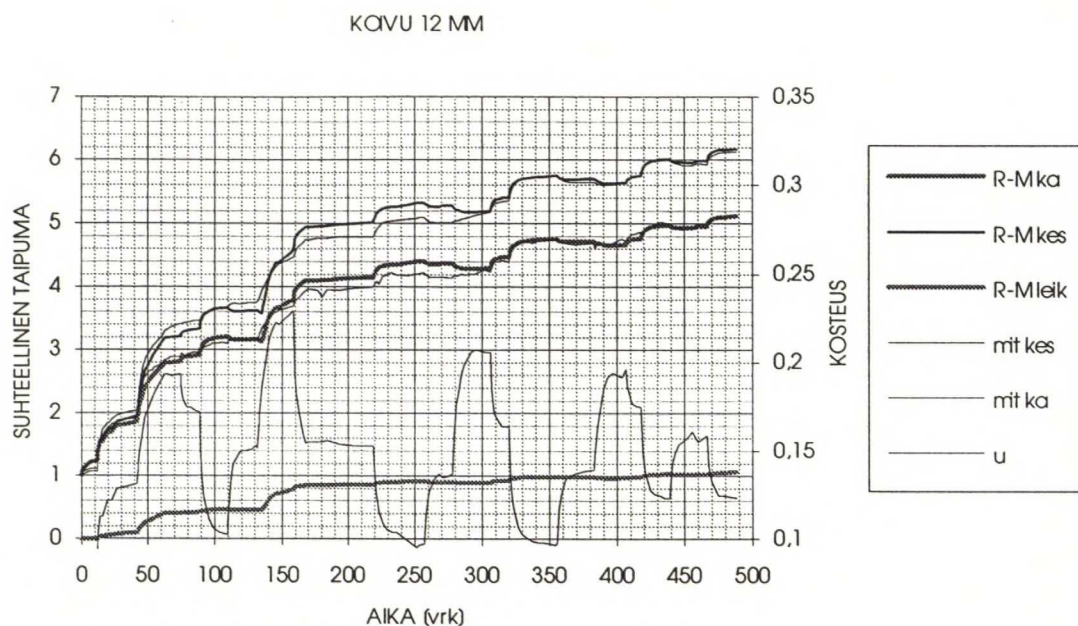
Taulukko 34. Nelipistetaivutuskokeen perusteella määritetyt arvot Ranta-Maunuksen kumulatiivisen mallin mukaiselle taivutusvirumalle.

	koivu 12 mm	havu 12 mm	havu 12mm poikittain	koivu 18 mm	erikoiskoivu 18 mm
a^-	-3,85	-1,6	-7,5	-6,8	-9,5
a^+	-1,4	-0,4	-5,0	-0,3	-2,0
a^{++}	14,2	10,4	13,3	17,7	23,0

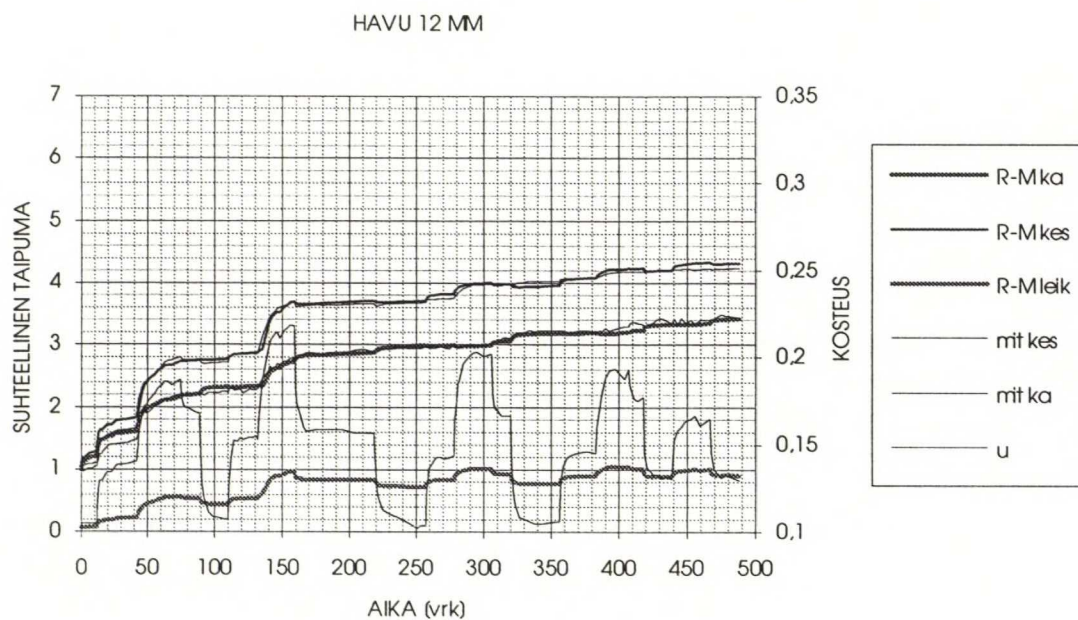
Kaavan (91) vakiokosteuspitoisuutta kuvaavan osan termien A_i määrittämisessä u :na käytettiin koko laskenta-ajan kunkin kosteuspitoisuuden kestoajalla painotettua keskiarvoa. Koska u :n suuruus ja sitä kautta myös termien A_i suuruus vaihtelee sen mukaan kuinka pitkiä kostutus- ja kuivatusjaksot ovat, voisi mallia tarkentaa jakamalla se ajallisesti useampaan osaan, esimerkiksi RH-jaksotuksen mukaan ja laskemalla kullekin jaksolle erikseen vakio- u . Tämä kuitenkin monimutkaistaa laskentaprosessia tarpeettomasti, sillä vakiokosteuksen merkitys on vähäinen verrattuna kosteuden vaihteluun, erityisesti nyt tehtyjen kokeiden tapauksessa missä kosteus vaihtelee jokseenkin säännöllisesti.

Kuvissa 32-36 on esitetty nelipistekoekappaleiden keskialueen ja keskipisteen suhteellinen viruma mallin mukaisesti laskettuina ja mittaustulosten mukaisesti. Lisäksi kuvissa on kappaleiden keskipisteiden suhteellinen leikkausviruma, joka on laskettu vähentämällä kokonaisviruman suhteellisesta arvosta keskialueen, eli taivutusvirman suhteellinen arvo. Se on siis suhteellinen arvo verrattuna kokonaisvirumaan. Laskenta tehtiin Excel-taulukkolaskentaohjelmalla sijoittamalla virumamalleihin kappaleista mitatut kosteudet ja muut tarvittavat arvot.

Kuvista huomataan koivuvanerin keskipisteen kokonaisviruman ja pelkän taivutusviruman kuvaajan samanmuotoisuus. Tämä johtuu leikkausmuodonmuutosten osuuden pysymisestä lähes vakiona. Poikittain kuormitetun taivutusviruma vaihtelee voimakkaasti, mutta keskipisteen kokonaisvirumassa vaihtelu kuitenkin pienenee, kun virumassa huomioidaan leikkausmuodonmuutosten ja kosteusmuutosten aiheuttamien pakkovoimien aiheuttama päinvastainen vaikutus.



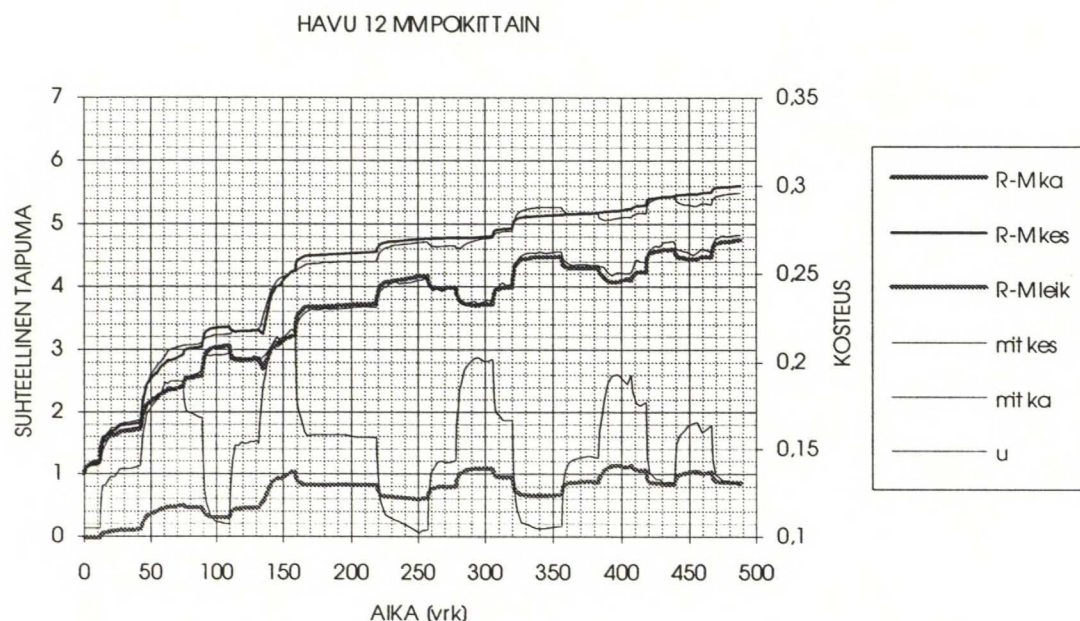
Kuva 32. 12 mm koivuvanerin keskialueen ja keskipisteen mallin mukaiset ja mitatut suhteelliset virumat sekä keskipisteen leikkausviruman osuus kokonaisvirumasta.



Kuva 33. 12 mm havuvanerin keskialueen ja keskipisteen mallin mukaiset ja mitatut suhteelliset virumat sekä keskipisteen leikkausviruman osuus kokonaisvirumasta

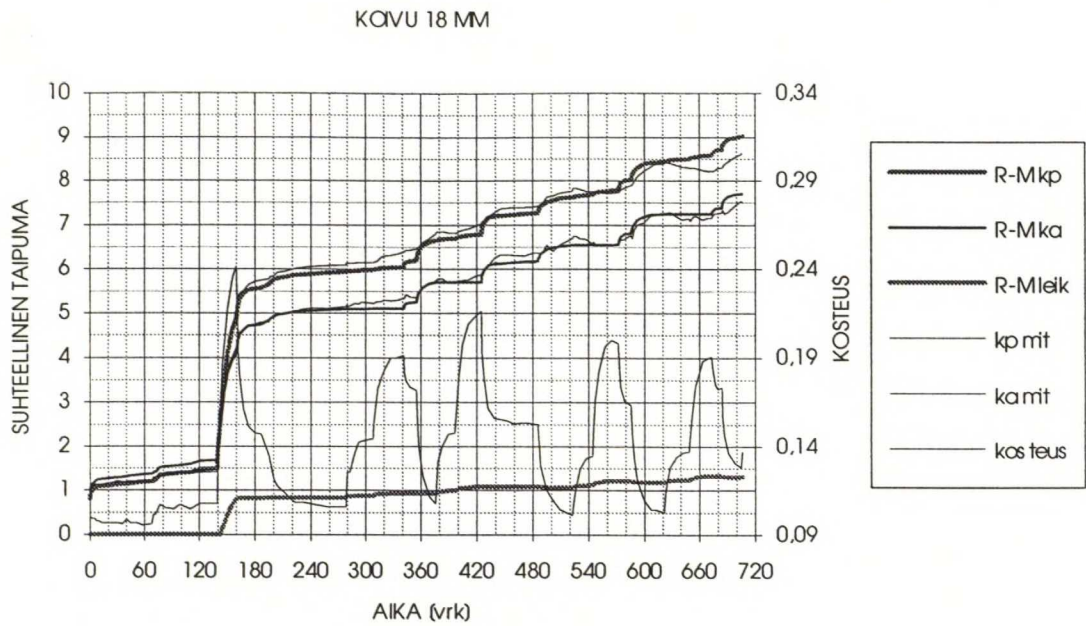
Havuvanerille määritettiin kumpaankin suuntaan omat arvot, koska kysymyksessä on paksuviiluinen havuvaneri, jonka pintaviilun suuntaisten viilujen osuus koko poikkileikkauksesta on suuri. On huomattava että vaikka ko. vanerin taivutusjäykkyys pituussuuntaan kuormitettaessa onkin suhteellisen suuri, keskimmäinen viilu on poikittain. Tämä selittää kuvasta 29 nähtävän leikkausmuodonmuutosten suuren suhteellisen osuuden kokonaistaipumasta.

Poikittain kuormitetun havuvanerin suhteellisen viruman kuvaajasta (kuva 34) sekä leikkausmuodonmuutosten osuuden kuvaajasta (kuva 30) huomataan, että tarkempi approksimaatio leikkausmuodonmuutosten osuudelle olisi maksimikosteuden jälkeen pikemminkin paraabeli kuin suora. Noin 15-17 p-% kohdalla keskipisteen laskennallinen suhteellinen viruma nimittäin jää selvästi mitattujen arvojen yläpuolelle, kun se kosteuspitoisuuden maksimi ja minimiarvoilla lähenee mitattuja arvoja.

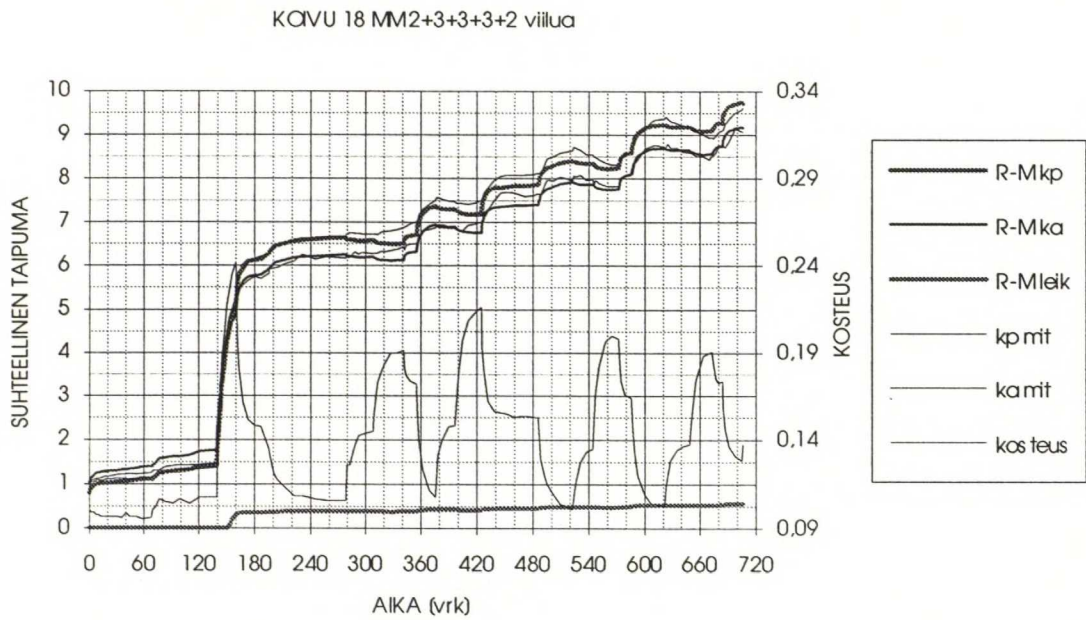


Kuva 34. Poikittain kuormitetun 12 mm havuvanerin keskialueen ja keskipisteen mallin mukaiset ja mitatut suhteelliset virumat sekä keskipisteen leikkausviruman osuus kokonaisvirumasta.

18 mm paksujen koivuvanerin taipumia toisiinsa verratessa huomataan, että suhteellinen taivutusviruma on erikoisvanerilla noin 20 % suurempi kuin normaalirakenteisella vanerilla. Tämä ero syntyi välittömästi ensimmäisen kostutusjakson aikana, pysyen sen jälkeen suunnilleen vakiona. Keskipisteen suhteellisessa virumassa tämä ero oli noin 12 %. Vaikka alkutaipuma erikoisvanerilla olikin noin 3 % pienempi, niin välittömästi kostutuksen alkaessa keskipisteen taipuma kasvaa suuremmaksi. Loppuvaiheessa erikoisvanerin taipuma oli jo 7 % suurempi kuin normaalivanerin. Tästä voidaan päätellä että vaikka koivuvanerin lyhytaikaista taivutuslujuutta ja -jäykkyyttä lisättäisiin viiluja suuntaamalla, niin vanerin joutuessa sykliseen kosteusrasitukseen taipumat lopulta kasvavat suuremmiksi kuin normaalivanerilla.



Kuva 35. 18 mm koivuvanerin keskialueen ja keskipisteen mallin mukaiset ja mitatut suhteelliset virumat sekä keskipisteen leikkausviruman osuus kokonaisvirumasta .

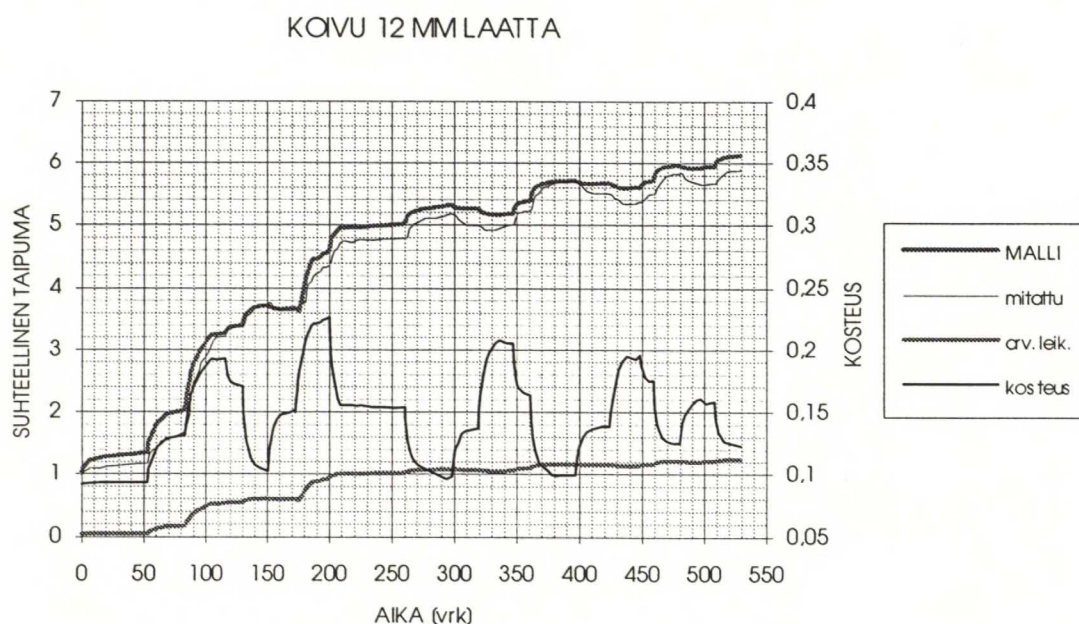


Kuva 36. 18 mm suunnatun koivuvanerin keskialueen ja keskipisteen mallin mukaiset ja mitatut suhteelliset virumat sekä keskipisteen leikkausviruman osuus kokonaisvirumasta

10.3. LAATTOJEN VIRUMAMALLI

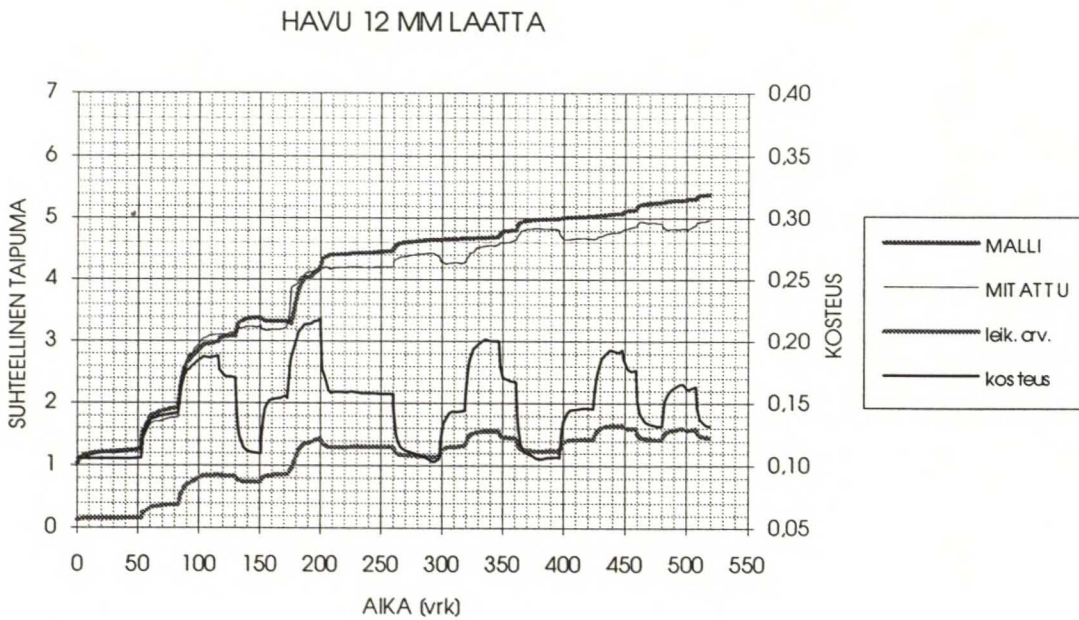
Nelipistekokeissa määritetyt a^+ , a^- , ja a^{++} -arvot sijoitettiin pistekuormitettujen laattojen kosteus- ja aikatietojen kanssa kaavaan (91) ja saatiin kuvien 37 ja 38 mukaiset kuvaajat. Leikkausmuodonmuutosten osuutena käytettiin samoja arvoja kuin nelipistekokeissa. Kuvista nähdään, että mallin mukaan lasketut suhteelliset virumat ovat hieman suurempia kuin mitatut virumat. Tästä voidaan päätellä, että laattatapauksissa leikkausmuodonmuutosten osuus kokonaistaipumasta on pienempi kuin neljännespisteistään kuormitetuilla palkeilla. Koska ko. arvoilla mallin mukaisesti lasketut ja mitatut virumat vastasivat melko hyvin toisiaan, todettiin että koekappaleiden pieni lukumäärä huomioon ottaen ei ole tarkoituksenmukaista etsiä pistekuormitetuille laatoille omia arvoja. Kaavassa (91) alkuhetken taivutusmomentin aiheuttaman taipuman osuutena käytettiin kaavojen (86) ja (87) avulla arvioitua arvoa, jotka koivulla oli 0,966 ja havulla 0,879.

Kuvien perusteella voidaan päätellä, että koivuvanerin tapauksessa on oikein olettaa, että myös laattatapauksissa leikkausmuodonmuutosten osuus pysyy jokseenkin vakiona kun kappale on saavuttanut maksimikosteuden. Kaavalla (86) laskettuna leikkauksen osuus muodonmuutoksista oli 200 vrk:n jälkeen 20,3 %. Tässä tapauksessa tämä arvo on kuitenkin hieman liian korkea, mikä näkyy kuvassa siitä, että mallin mukaan laskettu käyrä on ylempänä kuin mitattu käyrä. Käyrän muoto on kuitenkin lähellä mitattuja arvoja. Vakioiden a^+ ja a^- arvoissa puolestaan on pieni virhe koska ne on määritetty ainoastaan pituussuuntaan taivutetulle vanerille. Nyt mukana olleista vanereista koivuvanerilla on eri suunnissa pienempi ero kuin havuvanerilla johtuen vanereiden rakenteesta.



Kuva 37. Pistekuormitetun 12 mm koivuvanerilaatan mallin mukainen ja mitattu suhteellinen viruma sekä arvioitu leikkausviruman osuus kokonaisvirumasta ja kosteuspitoisuus.

Havuvanerilaatan viruma laskettiin nelipistekokeessa poikittain kuormitetulle havulle määritetyillä arvoilla. Kuvaajista huomataan sama ilmiö kuin nelipistekokeessakin eli keski-kosteuksilla suhteellisen viruman laskennallinen arvo on selvästi suurempi kuin mitattu arvo. Tämä johtunee liian suuresta leikkausmuodonmuutosten osuuden arviosta ko. kosteuspitoisuuksilla. Havuvanerilaatan kuvaajaa tarkastelemalla huomataan, että erityisesti kappaleen kostuessa olisi joko leikkausosuuden kerroin $q(t)$ tai termi a^+ jaettava kahteen osaan noin 15 % kosteuspitoisuuden kohdalla. Mitatuista virumista nimittäin havaitaan, että kappaleen kostuessa viruma pienenee kunnes kosteuspitoisuus saavuttaa noin 15 %:n rajan. tämän jälkeen kappaleen edelleen kostuessa viruma lähtee kasvuun. Näin ollen kun $u < 15\%$ pitäisi arvoa $q(t)$ pienentää edellä esitetystä, tai arvoa a^+ kasvattaa. Vastaavasti kosteuden ylittäessä 15 % arvoa $q(t)$ pitäisi kasvattaa tai arvoa a^+ pienentää. Tämän määrittäminen ja erityisesti pistekuormitetun havuvanerilaatan leikkausmuodonmuutokset pitkäaikaisrasituksessa ja kosteuden vaihdellessa vaatisivat lisäkokeita. Lisäksi on muistettava että tässä kokeessa mukana olleet havuvanerit olivat rakenteeltaan paksuviiluista, jonka jäykkyysominaisuudet eri suunnissa poikkeavat hyvin paljon toisistaan (ks kuvat 9 ja 10).



Kuva 38. Pistekuormitetun 12 mm havuvanerilaatan mallin mukainen ja mitattu suhteellinen viruma sekä arvioitu leikkausviruman osuus kokonaisvirumasta ja kosteuspitoisuus.

Laaditun mallin ja kuvien 37 ja 38 perusteella voidaan siis arvioida pistekuormitettujen vanerilaattojen leikkausmuodonmuutosten osuutta taipumiin pitkäaikaisrasituksessa. Kuvia ja mittaustuloksia tarkastelemalla huomataan, että leikkausmuodonmuutosten merkitys on aluksi vähäinen, mutta heti kostumisen alettua niiden osuus kasvaa. Saavutetun maksimikosteuden jälkeen osuus ei kuitenkaan juuri kasva, vaan jää koivuvanerilaatoilla noin 20 %:n tasolle ja havuvanerilla noin 30 %:n tasolle kokonaismuodonmuutoksista.

11. PÄÄTELMÄT

11.1. LYHYTAIKAISKOKEET JA LASKENTAMENETELMÄT

Laattojen murtokuormituskokeiden perusteella voidaan todeta että nykyisillä, homogenisoi-tuihin kimmokertoimiin perustuvilla taulukoilla ja käyrästöillä sekä näihin perustuvilla las-kentamenetelmillä ei saada pistekuormitettujen laattojen tapauksissa tarkkoja tuloksia muodonmuutosten laskennassa. Tämä johtuu siitä, että kyseiset laskentamenetelmät eivät ota huomioon vanerilaattojen tasoleikkausmuodonmuutoksia. Koetuloksia näillä menetel-millä laskettuihin taipumiin verrattaessa ero kokeellisten ja laskennallisten muodon-muutosten välillä oli 2-3-kertainen, eli leikkausmuodonmuutosten vaikutus pistekuor-mitettujen laattojen jäykkyyteen on huomattava.

Elementtimenetelmään perustuvaa kaupallista NISA-ohjelmaa ja kerroselementtiä käyttäen voidaan pistekuormitettujen vanerilaattojen muodonmuutosten laskennassa saada tarkkoja tuloksia. Nyt tehdyissä laskennoissa käytetyt kimmoarvot perustuivat kirjallisuudessa esitettyihin kosteuspitoisuudesta riippuviin arvoihin. Laskennan kuitenkin todettiin olevan muodonmuutosten osalta epätarkkaa, mikäli näitä kimmo- ja liukukertoimien arvoja käytetään sellaisenaan. NISA-laskennan tarkkuuden parantamiseksi on eri viilukerrostien teoreettisten liukukertoimien asemesta käytettävä rakenteen koko poikkileikkaukselle laskettuja näennäisiä liukukertoimia. Nyt esitetyllä tavalla redusoiduilla arvoilla saatiin erityisesti kuivempien vanerilaattojen tapauksissa lähes kokeita vastaavat taipumat. Redusoiduiksi liukukertoimien arvoiksi saatiin esimerkiksi 10,8 % kosteudessa koivuvanerille arvot 220 N/mm² ja 200 N/mm² pituus- ja poikkisuuntaan. Havuvanerilla vastaavina lukuina käytettiin 73 N/mm² ja 64 N/mm². Näitä arvoja vastaavien viilujen teoreettisten arvojen suhde oli 1200/117 ja 620/35.

Laskennassa tehdyn kimmoarvojen kosteusreduktion on oltava suurempi kuin nyt käytetty. Liukukertoimilla reduktio oli noin 40 % ja kimmokertoimilla noin 15-20 % kosteus-pitoisuudesta 10,8 % kosteuteen 22,5 % siirryttäessä. Tämä ei kuitenkaan ollut riittävä, sillä lasketut taipumat kasvoivat vain noin 20-40 %, kun kokeissa ero kuivemmasta kosteampaan oli 30-60 %. Tämän perusteella kosteusreduktion on tällä kosteusvälillä oltava kimmokertoimien osalta arviolta 5 %-yksikköä suurempi ja liukukertoimien osalta 10 %-yksikköä suurempi.

Ohjelman avulla lasketut koekappaleiden murtojännitykset puolestaan vastaavat kirjallisuudessa esitettyjä jännitysarvoja, joten tämän perusteella voidaan sanoa, että se soveltuu pistekuormitettujen vanerilaattojen taivutusjännitysten laskentaan ja näiden perusteella tapahtuvaan mitoittamiseen. Laskennan ja kokeiden perusteella koivuviilun murtojännitykseksi saatiin kuivilla koekappaleilla keskimäärin 129 N/mm². Havuviilun keskimääräinen murtojännitys oli 71 N/mm².

11.2. VIRUMAKOKEET JA -MALLIT

Tehtyjen laattojen virumakokeiden mukaisilla koejärjestelyillä ei voida määrittää pistekuormitettujen laattojen taipumalle leikkausmuodonmuutosten osuutta. Tästä johtuen laattojen leikkausmuodonmuutosten osuutta tarkasteltiin nelipistetaivutetuille palkeille johdetun virumamallin avulla.

Malli laadittiin keskialueen ja kokonaistaipuman välisiä suhteita tarkastelemalla. Näiden perusteella pystyttiin määrittämään leikkausmuodonmuutosten osuus kunakin ajanhetkenä. Kun osuus oli saatu taipumien perusteella määriteltäville etsittiin kappaleen kosteuspitoisuudesta riippuva yhteys ja määriteltiin leikkausmuodonmuutokset huomioon ottavat kertoimet $q(t)$ ja $m(t)$. Näiden kertoimien avulla leikkausviruma voitiin yhdistää taivutusvirumaan. Taivutusviruma määritettiin palkin keskialueen taipuman perusteella.

Koivuvanerin leikkausmuodonmuutosten osuuden kokonaistaipumasta todettiin pysyvän suunnilleen vakiona, kun oli saavutettu kosteuspitoisuuden maksimiarvo. 12 mm koivuvanerille tämä osuus oli noin 0,26, kun kappaleiden alkukosteus oli noin 10 p-% ja maksimikosteus noin 22,5 p-%. Ranta-Maunuksen /14/ tekemien tutkimusten mukaan kuitenkin sekä koivu- että havuvanerilla leikkausviruma lisääntyy kosteusvaihtelussa ainoastaan silloin, kun ylitetään aikaisempi maksimikosteus. Tämän mukaan leikkausmuodonmuutosten osuuden kokonaistaipumasta pitäisi pienentyä, varsinkin koivuvanerilla. Nyt kuitenkin koivuvanerin leikkausmuodonmuutosten osuus pysyi jokseenkin vakiona koko kokeen ajan eli koekappaleissa tapahtui myös leikkausvirumista.

12 mm havuvanerille leikkausmuodonmuutosten osuus kokonaistaipumasta vaihteli kosteuspitoisuuden mukana. Pituussuuntaan kuormitetuilla palkeilla vaihteluväli oli 0,30...0,35 ja poikittain kuormitetulla havuvanerilla vaihteluväli oli 0,25...0,35, kun kappaleiden kosteuspitoisuus vaihteli välillä 10-22 p-%. Tässä laskettu leikkausmuodonmuutosten osuus ottaa huomioon kosteusvaihtelun aiheuttamat muodonmuutokset ja niiden aiheuttamat pakkovoimat rakenteen sisällä.

Kehitetyllä mallilla laskettiin laattojen suhteelliset virumat käyttäen samoja lähtöarvoja kuin nelipistetaivutettujen palkkien tapauksissa. Mallilla laskettuja suhteellisia virumia mitattuihin suhteellisiin virumiin verrattaessa todettiin niiden olevan hyvin lähellä toisiaan. Tämän perusteella pääteltiin pistekuormitettujen laattojen leikkausmuodonmuutosten suhteellisen osuuden kokonaistaipumasta olevan näillä kuormitustapauksilla suunnilleen samansuuruisia kuin vastaavilla vanereilla nelipistetaivutuksessa, eli suuruusluokkaa 25-35 % kokonaistaipumasta.

Virumakokeiden perusteella voidaan todeta että koivuvanerin virumisessa leikkausmuodonmuutoksilla ei ole niin suurta merkitystä kuin havuvanerilla. Suoritetujen kokeiden ja erityisesti 18 mm koivuvanerien virumien perusteella voidaan todeta koivuviulun pituussuuntaisen viruman olevan hyvin voimakasta. Tämän takia viilujen suuntaamisella kasvatetun taivutusjäykkyyden mukanaan tuoma etu saatetaan kuitenkin menettää, mikäli rakenne joutuu sykliseen kosteusrasitukseen.

12. JATKOTUTKIMUSTARVE

Koska vanereita käytetään paljon kuljetusvälineteollisuudessa, ne joutuvat suurten piste-kuormarasitusten lisäksi alttiiksi myös suurille lämpötilan vaihteluille. Tästä syystä tulisi tutkia vanerin lujuusominaisuuksia eri kosteuspitoisuuksien lisäksi myös vaihtelevissa lämpötiloissa, myös jäätyneenä. Lisäksi erilaisten pintamateriaalien vaikutusta vanerilaattojen kestävyys erityisesti taivutusmurron ja kulutuskestävyyden kannattaisi tutkia.

Virumamallien edelleen kehittäminen erityisesti leikkausviruman osalta vaatisi lisätutkimuksia. Tällöin pitäisi koejärjestelyt rakentaa siten että leikkausmuodonmuutosten osuus kokonaistaipumasta on riittävän suuri ja sen osuus on helposti määriteltävissä joko koekappaleesta itsestään tai vastaavasta materiaalista valmistetun vertailukappaleen avulla joka on kuormitettu esimerkiksi nelipistetaivutettuna. Leikkausvirumaa voisi näin tutkia itsenäisenä, erillään taivutusvirumasta.

Nyt esitettyä mallia leikkausviruman yhdistämisestä taivutusvirumaan kertoimien $q(t)$ ja $m(t)$ avulla voisi kehittää. Näille kertoimille voisi olla löydettävissä riippuvuus esimerkiksi viilujen lukumäärästä ja suuntauksesta sekä kuormitusasteesta. Lisäksi kuormitustilanteen alkukosteuden ja kosteusvaihtelun ylä- ja alarajoilla on todennäköisesti vaikutusta $q(t)$:n suuruuteen. Esimerkiksi kahdesta rinnakkaispalkista eri kuormitustavoilla voidaan määrittää lyhytaikaikuormituksen taipumien leikkausmuodonmuutosten suhteellinen osuus jos tunnetaan suhde E/G . Kokeilla voisi tarkistaa noudattaako leikkausviruman suhteellinen osuus kokonaistaipumasta samaa suhdetta kuin leikkausmuodonmuutokset lyhytaikaikuormituksessa.

Koska koivuvanerin taipumasta suuri osa johtuu viilun pituussuuntaisesta virumisesta, tulisi koivuviilun pituussuuntaisen ja koivuvanerin taivutusviruman osalta tehdä lisätutkimuksia. Näissä kuormitusjärjestelyt tulisi järjestää siten että viiluissa tai vanereissa esiintyy ainoastaan joko puristuksen tai vedon aiheuttamia jännityksiä. Siten pystyttäisiin arvioimaan kummalla on suurempi merkitys kokonaisvirumalle.

13. YHTEENVETO

13.1. VANERIEN LUJUUSOMINAISUUDET

Vanerien lujuusominaisuuksia tarkasteltiin aluksi kerroslaattojen kimmoteorian perusteella. Tarkastelu aloitettiin viilun ortotrooppisten ominaisuuksien selvittämisellä ja vertailtiin eri lähteistä saatuja lujuusarvoja ja niiden kosteusrippuvuuksia. Viilujen lujuusominaisuuksien jälkeen tarkasteltiin vanerin lujuus- ja jäykkyysominaisuuksia viilujen lujuusarvoihin ja kerrokselliseen rakenteen teoriaan perustuen. Vertailussa todettiin normaalin, tasapaksuista viiluista valmistetun vanerin viiluun verrattujen suhteellisten jäykkyysominaisuuksien molemmissa pääsuunnissa lähestyvän arvoa 0,5 kun vanerin paksuus kasvaa. Esimerkiksi 21 viilun vanerilla taivutuslujuuksien suhde eri suunnissa on 60/50 ja taivutuskimmokertoimien suhde on 57/43. Puristuskimmokertoimella ero on vieläkin pienempi suhteen ollessa 53/48 (kuvat 6-8).

Vanerin eri suuntaisista jäykkyysarvoista laskettiin esitetyllä kerroslaattojen teorialla esimerkkejä, joiden avulla todettiin että kerrosten paksuudella ja suuntaamisella voidaan vaikuttaa vanerien jäykkyysominaisuuksiin. Laskettuja arvoja vertailtiin kirjallisuudesta löytyviin arvoihin. Laskettujen arvojen todettiin olevan lähellä taivutuskokeisiin perustuvia homogenisoituja arvoja.

13.2. MITOITUSMENETELMIEN TARKASTELU

Vanerilaattojen mitoitusmenetelmiä tarkasteltiin lyhyesti alkaen ortotrooppisten laattojen differentiaaliyhtälöstä. Pistekuormitettujen laattojen ratkaisumenetelmistä esiteltiin käyrästöihin perustuva mm. käsikirjassa RIL 162 esitetty menetelmä ja Handbook of Finnish Plywood -käsikirjassa esitettyihin taulukkoarvoihin perustuva menetelmä. Näillä menetelmillä laskettuja muodonmuutoksia verrattiin koetuloksiin ja todettiin laskentatulosten olevan epätarkkoja, koska ne eivät ota huomioon leikkausmuodonmuutoksia. Koetulosten ero laskettuihin taipumiin oli jopa 2-3-kertainen.

Mitoitusmenetelmistä tarkasteltiin myös elementtimenetelmään perustuvan kaupallisen NISA-ohjelmiston soveltuvuutta pistekuormitettujen laattojen ratkaisuun. Todettiin että ohjelmistoa voidaan käyttää taipumien ja jännitysten laskentaan, mikäli kimmo- ja liukukertoimille tehdään riittävä kosteusreduktio. Kosteuden kasvaessa 10,8 %:ista 22,5 %:iin riittäväksi reduktioksi arvioitiin kimmokertoimille noin 25 % ja liukukertoimille noin 50 %. Lähtöarvoina tässä on viilujen teoreettiset, eri lähteiden mukaisesti kosteudesta riippuvat arvot kosteuspitoisuudessa 10,8%. Lisäksi ohjelman tapa käsitellä liukukertoimia todettiin taipumien kannalta virheelliseksi, sillä se laskee liukukertoimen eri kerrosten keskiarvona, kun sen pitäisi olla lähempänä pienempää liukukerrointa. Näin ollen liukukertoimia on kosteusreduktion lisäksi muutettava vastaamaan koko poikkileikkauksen näennäistä keskimääräistä liukukerrointa. Tällainen reduktio on kuitenkin työläs toteutettava ja aiheuttaa ylimääräisen laskentavaiheen laattojen analysointiin.

13.3. MURTOKUORMITUSKOKEET

Pistekuormitetuilla laatoilla tehtiin lyhytaikaisia, murtoon päättyviä kuormituskokeita. Koekappaleet valmistettiin neljästä eripaksuisesta koivuvanerista, kahdesta havuvanerista ja yhdestä sekavanerista. Koekappaleita oli yhteensä 84.

Kokeita tehtiin kahdessa eri kosteuspitoisuudessa: n. 11-12 % ja 22,5 %. Eri jännevälejä oli kolme ja kuormitustapoja kolme. Tehtyjen kokeiden perusteella todettiin pistekuormitettujen laattojen murren tapahtuvan yleensä aina taivutusmurtona kuormituspisteen kohdalta.

Murtojännitykset laskettiin NISA-ohjelmiston avulla ja todettiin niiden kuivemmilla koekappaleilla vastaavan kirjallisuudessa esitettyjä arvoja. Koivun keskimääräiseksi murtojännitykseksi saatiin 129 N/mm² ja havuviilun 71 N/mm². Taulukon 35 perusteella kostumisen heikentävä vaikutus murtolujuuksiin on koivulla 15 % ja havulla noin 10 %. Ominaislujuuksien vastaava ero RIL 120 mukaan kosteusluokasta 1 kosteusluokkaan 3 siirryttäessä on koivuviilun taivutukselle 37,5 % ja vedolle 14 %. Havuviilulla vastaavat erot ovat 43 % ja 33 %.

Leikkausmuodonmuutosten ja leikkausmurtojännitysten suuruutta ei näiden pistekuormitettujen laattojen kokeiden perusteella voitu määrittää. Leikkausvoimia huomioimattomiin laskentamenetelmiin tehdyn taipumien vertailun perusteella voidaan kuitenkin sanoa leikkausmuodonmuutosten merkityksen olevan huomattavan.

13.4. VIRUMAKOKEET

Työssä tehtiin virumakokeita sekä pistekuormitetuilla laatoilla ja nelipistetaivutetuilla palkeilla. Kokeiden aikana kuormitusaste pidettiin vakiona ja kosteuspitoisuutta vaihdeltiin. Kappaleiden kuormitusasteena oli laattakokeessa noin 0,11 lyhytaikaisesta murtokuormasta. Palkkien kuormitusasteena oli 0,17-0,20.

Mittausten mukaan koivuvanerilaattojen taipumat kasvavat 500 vrk:ssa noin kuusinkertaiseksi ja havuvanerin noin viisinkertaiseksi alkutaipumiin verrattuina, kun ilman suhteellinen kosteus vaihtelee syklisesti välillä RH 45...90%. Tehdyn virumamallin ja mitattujen taipumien tarkastelun perusteella leikkausmuodonmuutosten osuudeksi pistekuormitettujen laattojen kokonaistaipumista määritettiin noin 25-35 %.

13.5. VIRUMAMALLIT JA NIIDEN KEHITTÄMINEN

Koivu- ja havuvanerin viruminen on aikaisemmin tehtyjen tutkimusten perusteella luonteeltaan erilaista. Koivuvanerin viruma lisääntyy jatkuvasti kosteuden vaihdellessa. Tämä ei johdu niinkään leikkauksesta, vaan viruminen johtuu taivutusviruman jatkuvasta kasvusta. Havuvanerilla sekä taivutus- että leikkausviruma pysähtyy kun kosteuspitoisuus ei nouse aiemmin saavutettua maksimiarvoa korkeammaksi. Jos kosteus kuitenkin nousee, lisääntyy

havuvanerin viruma voimakkaasti ja tästä virumasta suuri osa johtuu leikkausviruman voimakkaasta kasvusta.

Virumamallien osalta tarkasteltiin kahta Ranta-Maunuksen /14/ esittämää virumamallia. Mallien tarkastelussa rajoituttiin vakiokuormitukseen vaihtelevissa kosteusolosuhteissa. Kumulatiivisessa mallissa viruma lisääntyy jatkuvasti kosteuden muutosten vaikutuksesta, eli se sopii aikaisempien tutkimusten mukaan koivuvanerin taivutusviruman arviointiin. Maksimimallissa taas kosteuden vaihtelulla on oleellinen merkitys virumaan ainoastaan silloin, kun se ylittää aikaisemmin saavutetun maksimikosteuspitoisuuden. Maksimimalli sopii siis koivuvanerin leikkausviruman arvioimiseen ja havuvanerin molempien virumatyyppien mallittamiseen.

Nyt tehtyjen kokeiden perusteella kumulatiivista taivutusviruman mallia kehitettiin edelleen. Kehitetystä mallissa kokonaisviruma lasketaan taivutusvirumasta leikkausmuodonmuutokset huomioon ottavalla termillä kertomalla.

Mallin kehittäminen perustui mahdollisuuteen määrittää nelipistetaivutetun palkin keskialueen viruma, jonka voidaan katsoa muodostuvan pelkästään taivutusvirumasta. Keskialueen suhteellista virumaa käytetään siis mallin perusvirumana.

Palkin keskialueen taipumaa verrattiin keskipisteen kokonaistaipumaan ja mitattujen taipumien suhteiden avulla määritettiin leikkausmuodonmuutosten osuudet koko taipumasta. Leikkausmuodonmuutosten osuudelle etsittiin tämän jälkeen mittaustulosten perusteella kosteusrippuvuuskaavat kullekin kokeessa mukana olleelle vanerityypille. Näiden empiiristen kaavojen avulla määritettiin leikkausmuodonmuutokset huomioon ottavat kertoimet, jotka yhdistettiin kumulatiivisen mallin mukaisesti laskettuun taivutusvirumaan.

Mallin perustaksi valittiin kumulatiivinen malli sillä perusteella että maksimimalli on oikeastaan kumulatiivisen mallin erikoistapaus missä vakiot a^+ ja a^- ovat nollija. Lisäksi kokeessa mukana olleen paksuviiluisen havuvanerin viruma noudatti Ranta-Maunuksen tutkimuksista poiketen lähinnä kumulatiivista mallia.

Mallin tarvitsemat kosteushistorian ja -vaihtelun huomioon ottavat termit a^{++} , a^+ ja a^- määritettiin palkkikokeiden keskialueen taipumien perusteella. Nämä poikkesivat selvästi Ranta-Maunuksen määrittelemistä arvoista.

Nyt määritetyillä malleilla lasketut suhteelliset virumat noudattivat koko kokeen ajan melko tarkasti nelipistekokeen kahdesta rinnakkaiskoeleikkauksesta mitattua keskimääräistä suhteellista virumaa. Malli siis huomioi riittävästi leikkausmuodonmuutoksia ja kosteusmuodonmuutosten aiheuttamia sisäisiä pakkovoimia.

Pistekuormitetuille laatoille laskettiin saman mallin mukainen suhteellinen viruma. Koska mallin mukainen viruma noudatti melko tarkasti mitattuja suhteellisia virumia, todettiin että nelipistekokeen perusteella määritetyt mallin vakiot vastaavat riittävän tarkasti myös näitä kuormitustapauksia. Havuvanerin tapauksessa käytettiin poikittain kuormitetulle palkille määriteltyjä arvoja.

Laadittuun malliin ja vertailukappaleina olleisiin nelipistetaivutettuihin koekappaleisiin perustuen laattojen leikkausmuodonmuutosten osuudeksi määriteltiin 25-35 % kokonaisvirumasta.

KIRJALLISUUTTA

- /1/ Dinwoodie, J.M. Timber, its nature and behaviour. Van Nostrand Reinhold Company. Lontoo 1981.
- /2/ Handbook of Finnish Plywood. Finnish Plywood International. 1991. 48 s. ISBN 952-90-1976-9.
- /3/ Kokki, Koskinen, Rinne. Puurakenteet 2, Puulevyt. Rakentajain kustannus Oy. Helsinki 1986. ISBN 951-676-088-0.
- /4/ Kollmann F.F.P, Côte W.A. Principles of Wood Science and Technology I, Solid Wood. Berliini 1968.
- /5/ Kollmann F.F.P, Côte W.A. Principles of Wood Science and Technology II, Wood Based Materials. Berliini 1968.
- /6/ Koponen Simo. Vanerilaattojen lujuuden ja taipumien laskenta NISA-ohjelmistolla. Teknillinen korkeakoulu, Talonrakennustekniikan laboratorio, moniste. 1991
- /7/ Korttesmaa Markku. Puurakenteet 4, Laskentamenetelmät. Rakentajain kustannus Oy. Helsinki 1981. 160 s. ISBN 951-676-090-2.
- /8/ Kähkönen Leo. Kantavat puurakenteet -insinööriopetus. Rakentajain kustannus Oy. Helsinki 1985. 148 s. ISBN 951-676-324-3.
- /9/ Kärkkäinen Matti. Puu, sen rakenne ja ominaisuudet. Helsinki 1977. 442 s.
- /10/ Lehtonen Arto. Vanerin käyttö kuljetusvälineolosuhteissa, diplomityö. 1989. 143 s.
- /11/ Manninen Juhani. Puu ja Puutuotteet rakennustarvikkeina. Rakentajain kustannus Oy, Helsinki 1987. 85 s. ISBN 951-676-232-8.
- /12/ Niskanen Erkki. On the Strength and Elasticity Characteristics of Finnish Structural Birch Plywood. Valtion teknillinen tutkimuslaitos. 1963
- /13/ Pennala Erkki. Puuperäisten kerroslevyjen teoreettisista kimmo- ja lujuusominaisuuksista. Teknillinen Korkeakoulu. 1979 47 s.
- /14/ Ranta-Maunus Alpo. A study of the creep of plywood. Valtion teknillinen tutkimuskeskus. Rakenteiden mekaniikan laboratorio, tiedonanto 5. Espoo 1976. ISBN 951-38-0380-5
- /15/ Ranta-Maunus Alpo. A theory for the creep of wood with application to birch and spruce plywood. Valtion teknillinen tutkimuskeskus. Helsinki 1973. 35 s. ISBN 951-38-0013-X.

- /16/ Ranta-Maunus Alpo. Viscoelasticity of plywood under constant climatic conditions. Valtion teknillinen tutkimuskeskus. Helsinki 1972.
- /17/ Rautakorpi Heikki. An analysis of constructional plywood. Valtion teknillinen tutkimuslaitos. Helsinki 1971. 81 s. Julkaisu 165.
- /18/ Rautakorpi Heikki. Vaneri kerroksellisena rakenteena. Valtion teknillinen tutkimuslaitos. Helsinki 1969. 73 s. Tiedotus. Sarja III-rakennus 138.
- /19/ Rautakorpi Heikki. Investigations of transversely loaded plywood plates, part I. Valtion teknillinen tutkimuslaitos. Helsinki 1969. Tiedotus. Sarja III-rakennus 140.
- /20/ Rautakorpi Heikki. Investigations of transversely loaded plywood plates, part II. Valtion teknillinen tutkimuslaitos. Helsinki 1972. Tiedotus. Sarja III-rakennus 173.
- /21/ RIL 106. Puurakenteet. Suomen Rakennusinsinöörien liitto. Helsinki 1975. 366 s. ISBN 951-758-006-1.
- /22/ RIL 120-1986. Puurakenteiden suunnitteluohjeet. Suomen Rakennusinsinöörien Liitto. 1986. 145 s. ISBN 951-758-114-9.
- /23/ RIL 162-1. Puurakenteet I. Suomen Rakennusinsinöörien Liitto. Helsinki 1987. 248 s. ISBN 951-758-143-2.
- /24/ SFS 2417. Suomalainen koivuvaneri. Suomen standardisoimisliitto. 1991.
- /25/ SFS 4091. Suomalainen sekavaneri. Suomen standardisoimisliitto. 1988.
- /26/ SFS 4092. Suomalainen havupuuvaneri. Suomen standardisoimisliitto. 1988.
- /27/ SFS 4092. Suomalaisten rakennevanereiden mitat ja toleranssit. Suomen standardisoimisliitto. 1988.
- /28/ WISA-Vanerit, mitoituskäsikirja. Kymmene Schauman wood. 1994. 27 s.

LIITE 1. Koevanerien teoreettiset kimmokertoimet

Koevanerien teoreettiset vetokimmokertoimet eri lähteiden mukaan laskettuina.

VETOKIMMOKERROIN									
KERROSLAATTOJEN TEORIA				n.10,8 p-%		n.13 p-%		n.22,5 p-%	
tyyppi	tunnus	laji	viilu-lkm	E	E⊥	E	E⊥	E	E⊥
1.	K12	koivu 12	11	9 630	8 025	9 263	7 719	7 677	6 398
2.	K18	koivu 18	13 *	9 229	8 426	8 877	8 105	7 357	6 718
3.	K24	koivu 24	21	9 248	8 407	8 895	8 087	7 373	6 702
4.	H12	havu 12	7 **	8 780	4 917	8 440	4 727	6 973	3 905
5.	H18	havu 18	9 **	6 002	7 695	5 770	7 397	4 767	6 111
6.	B12	koivu 12	9 *	9 416	8 239	9 057	7 925	7 507	6 568
7.	C18	seka 18	13 *	7 160	6 537	6 883	6 284	5 686	5 192
RIL 120 aikaluokka C				KL 1		KL 2		KL 3	
tyyppi	tunnus	laji	viilu-lkm	E	E⊥	E	E⊥	E	E⊥
1.	K12	koivu 12	11	9 949	8 291	8 509	7 091	8 247	6 873
2.	K18	koivu 18	13 *	9 535	8 705	8 155	7 445	7 904	7 216
3.	K24	koivu 24	21	9 554	8 686	8 171	7 429	7 920	7 200
4.	H12	havu 12	7 **	8 462	4 738	7 000	3 920	6 462	3 618
5.	H18	havu 18	9 **	5 784	7 416	4 785	6 135	4 417	5 663
6.	B12	koivu 12	9 *	10 134	8 106	8 667	6 933	8 400	6 720
7.	C18	seka 18	13 *	6 900	6 300	5 708	5 212	5 269	4 811
Handbook						table 3. 15 p-%		table 3. 27 p-%	
tyyppi	tunnus	laji	viilu-lkm			E	E⊥	E	E⊥
1.	K12	koivu 12	11			8 100	7 070	6 480	5 656
2.	K18	koivu 18	13 *			7 930	7 230	6 344	5 784
3.	K24	koivu 24	21			7 850	7 320	6 280	5 856
4.	H12	havu 12	7 **			7 300	4 320	5 840	3 456
5.	H18	havu 18	9 **			5 020	6 590	4 016	5 272
6.	B12	koivu 12	9 *			8 100	7 070	6 480	5 656
7.	C18	seka 18	13 *		****	6 080	5 540	4 864	4 432
TAIVUTUSKIMMOKERROIN									
KERROSLAATTOJEN TEORIA				n.10,8 p-%		n.13 p-%		n.22,5 p-%	
tyyppi	tunnus	laji	lkm	E	E⊥	E	E⊥	E	E⊥
1.	K12	koivu 12	11	11 142	6 367	10 717	6 124	8 883	5 076
2.	K18	koivu 18	13 *	10 084	7 464	9 700	7 180	8 039	5 951
3.	K24	koivu 24	21	10 066	7 549	9 682	7 261	8 025	6 018
4.	H12	havu 12	7 **	8 956	4 371	8 609	4 201	7 112	3 471
5.	H18	havu 18	9 **	6 605	6 880	6 349	6 613	5 245	5 463
6.	B12	koivu 12	9 *	10 703	6 729	10 295	6 472	8 533	5 364
7.	C18	seka 18	13 *	7 824	5 791	7 521	5 567	6 213	4 599
RIL 120 aikaluokka C				KL 1		KL 2		KL 3	
tyyppi	tunnus	laji	viilu-lkm	E	E⊥	E	E⊥	E	E⊥
1.	K12	koivu 12	11	11 594	6 646	9 916	5 684	9 610	5 510
2.	K18	koivu 18	13 *	10 473	7 767	8 957	6 643	8 682	6 438
3.	K24	koivu 24	21	10 421	7 819	8 913	6 687	8 638	6 482
4.	H12	havu 12	7 **	8 920	4 280	7 379	3 541	6 812	3 268
5.	H18	havu 18	9 **	6 424	6 776	5 314	5 606	4 906	5 174
6.	B12	koivu 12	9 *	11 173	7 067	9 556	6 044	9 262	5 858
7.	C18	seka 18	13 *	7 579	5 621	6 270	4 650	5 788	4 292
Handbook						table 3. 15 p-%		table 3. 27 p-%	
tyyppi	tunnus	laji	viilu-lkm			E	E⊥	E	E⊥
1.	K12	koivu 12	11			9 320	5 860	7 456	4 688
2.	K18	koivu 18	13 *			8 730	6 440	6 984	5 152
3.	K24	koivu 24	21			8 440	6 740	6 752	5 392
4.	H12	havu 12	7 **			7 550	4 060	6 040	3 248
5.	H18	havu 18	9 **			5 420	6 200	4 336	4 960
6.	B12	koivu 12	9 *			9 320	5 860	7 456	4 688
7.	C18	seka 18	13 *			6 680	4 940	5 344	3 952

* Pintaviilun paksuudeksi oletettu 1,1 mm
** Pintaviilun paksuudeksi oletettu 1,25 mm
**** 18 mm havuvanerin arvot

LIITE 2.

Yksittäisten koekappaleiden koetulokset.

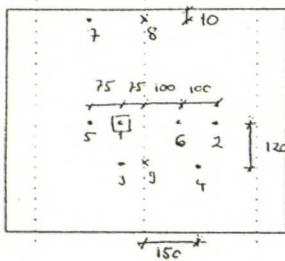
1/6 - 1/7 RH= 70 %	1/6 - 1/7 RH= 70 %	kuormitus pvm	rinnakkais u-keskim	tiheys teskim	rinnakkais tih-keskim	koko levy t-keskim	rinnakkais t-keskim	FA-murto	wA-murto	FB-murto	wB-murto	Ft-murto	wt-murto	F-murto keskim	keski- hajonta	keski- hajonta
				kg/m3	kg/m3	mm	mm	kN	mm	kN	mm			kN	kN	%
K18L2K21		27/06		698,6		17,65		19,30	8,13	19,80	8,76					
2	K18L2K2k	27/06	10,59 %	687,2	681,9	17,71	17,71	19,09	9,58	19,12	11,30	18,25	8,30	18,07	1,32	7,31
3		27/06		660,0		17,76		16,67	6,90			19,85	10,57			
H18L2K21		27/06		511,0		17,76		9,48	9,20	9,48	8,10	13,00	14,35			
2	H18L2K2k	27/06	10,27 %	501,1	501,0	17,68	17,74	8,85	7,87	8,85	7,64	11,56	11,25	9,58	0,79	8,25
3		27/06		491,0		17,77		10,42	10,07	10,68	9,65	14,02	15,31			
K12L3K21		30/06		731,7		12,06		9,60	9,74	9,31	9,79	10,26	14,32			
2	K12L3K2k	30/06	10,77 %	704,8	724,3	12,10	12,09	9,51	9,54	10,32	10,87			9,50	0,10	1,04
3		30/06		736,4		12,09		9,40	9,49	9,46	10,43	9,26	11,02			
H12L3K21		30/06		506,7		11,99		5,11	8,07	5,54	8,98					
2	H12L3K2k	30/06	12,21 %	501,0	499,8	11,97	11,99	4,34	7,09	4,59	7,70	4,72	8,44	4,61	0,43	9,42
3		30/06		491,7		12,00		4,38	7,54	5,73	9,70					
K24L3K21		01/07		714,1		23,41		25,33	7,80	27,21	9,52	28,56	15,03			
2	K24L3K2k	01/07	11,02 %	695,5	707,7	23,45	23,42	25,06	8,09	25,06	8,19			25,30	0,23	0,91
3		01/07		713,6		23,41		25,52	8,50	26,73	9,68	28,85	14,48			
K24L5K21		30/06		735,1		23,29		20,01	11,47	20,65	11,31	24,32	19,24			
2	K24L5K2k	30/06	11,02 %	716,9	728,1	23,27	23,20	23,04	13,75	19,91	11,77			21,08	1,44	6,82
3		30/06		732,4		23,04		22,68	13,21	23,13	14,77					
K24L3K41		01/09		730,0		23,28		29,45	9,23							
2	K24L3K4k	01/09	10,38 %	705,6	714,0	23,35	23,31	34,29	10,45					30,92	2,92	9,45
3		01/09		706,4		23,30		29,03	8,53							
K24L5K41		01/07		703,4		23,00		22,42	11,20							
2	K24L5K4k	01/07	10,54 %	710,6	709,9	23,01	23,10	24,89	12,27					24,11	1,47	6,08
3		01/07		715,7		23,30		25,03	11,60							
K18L2K11		28/06		679,7		17,66		13,71	6,81							
2	K18L2K1k	28/06	10,51 %	693,3	692,4	17,60	17,64	19,58	9,10					17,22	3,10	17,99
3		28/06		704,1		17,65		18,37	8,37							
H18L2K11		28/06		504,2		17,95		10,61	10,58							
2	H18L2K1k	28/06	10,49 %	487,0	496,2	18,04	17,95	12,53	12,22					13,34	3,22	24,15
3		28/06		497,5		17,85		16,90	17,26							
K24L3K11		01/07		709,6		23,51		25,14	8,63							
2	K24L3K1k	01/07	10,37 %	682,4	698,5	23,52	23,49	23,52	8,60					24,01	0,99	4,12
3		01/07		703,7		23,43		23,35	8,68							
K24L5K11		30/06		729,3		23,14		19,06	12,86							
2	K24L5K1k	30/06	10,83 %	728,8	724,9	23,33	23,23	20,44	13,59					18,82	1,75	9,29
3		30/06		716,8		23,21		16,97	11,42							
koivu	koivu	kuivat	10,67 %		709,1											7,0
havu	havu		10,99 %		499,0											13,9
kaikki	kaikki		10,75 %													8,7

[illegible]

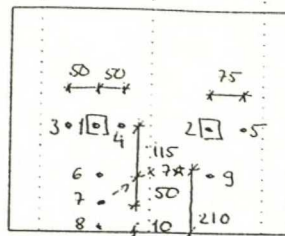
[illegible]

LIITE 3.

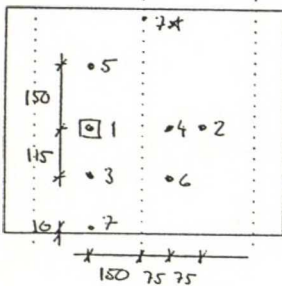
Koekappaleiden mitta-anturien sijainti ja voima/taipumakuvaajat



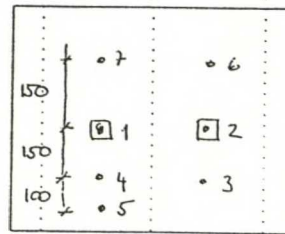
K24L3K41-3



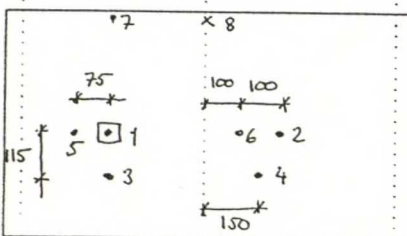
K18L3K21-3
C18L3K21
C18L3K22,3
B12L3K21-3



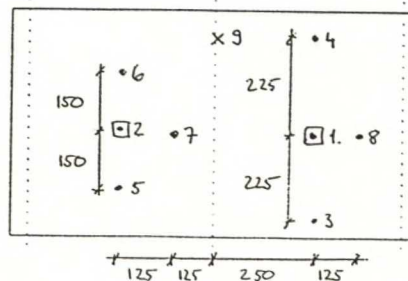
K24L3K14,5
B



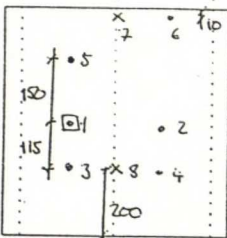
K24L3K21-3



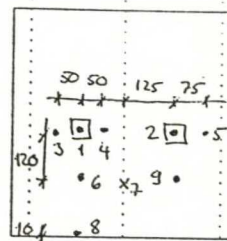
K24L5K14-6



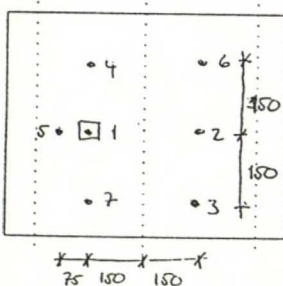
K24L5K21-3



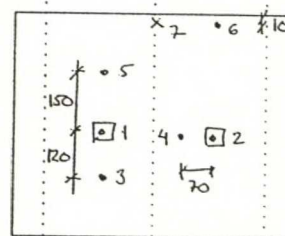
H18L2K14-6
K18L2K14-6



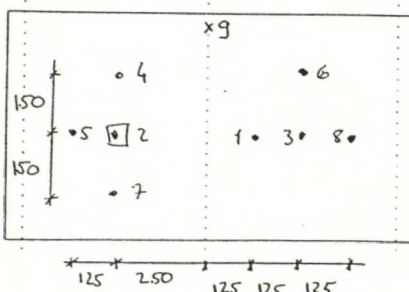
B12L2K21-3
H12L2K21-3
C18L2K21-3



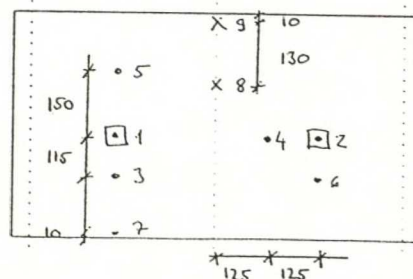
K24L3K11-3



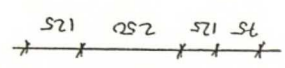
H12L3K24-6
K12L3K24-6
K24L3K24-6



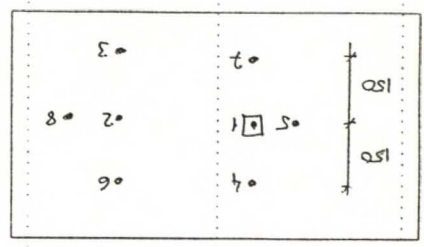
K24L5K1-3



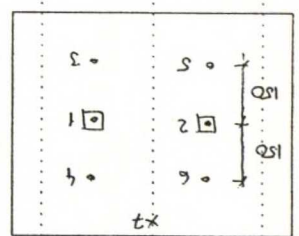
K24L5K24-3



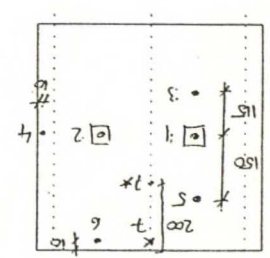
k24L5K41-3

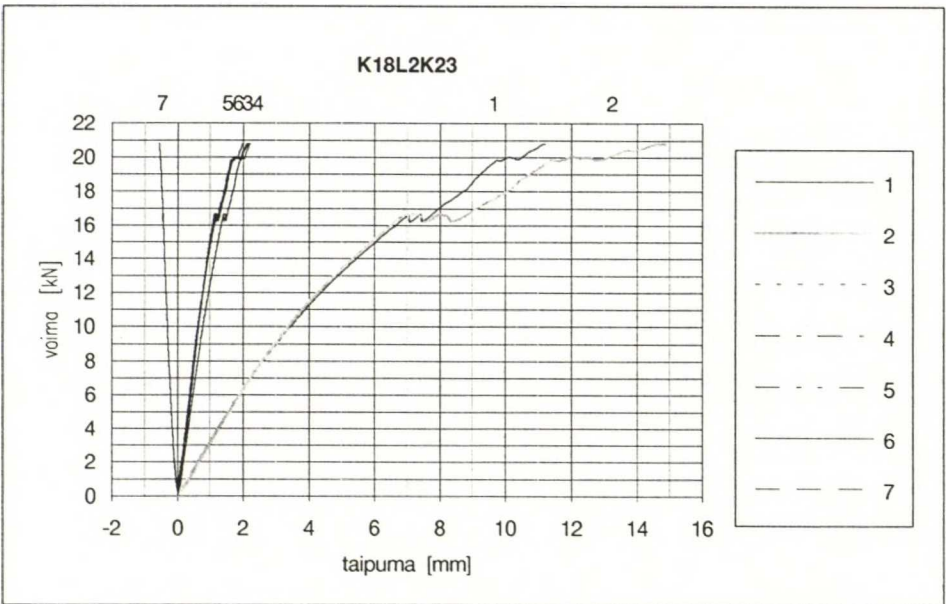
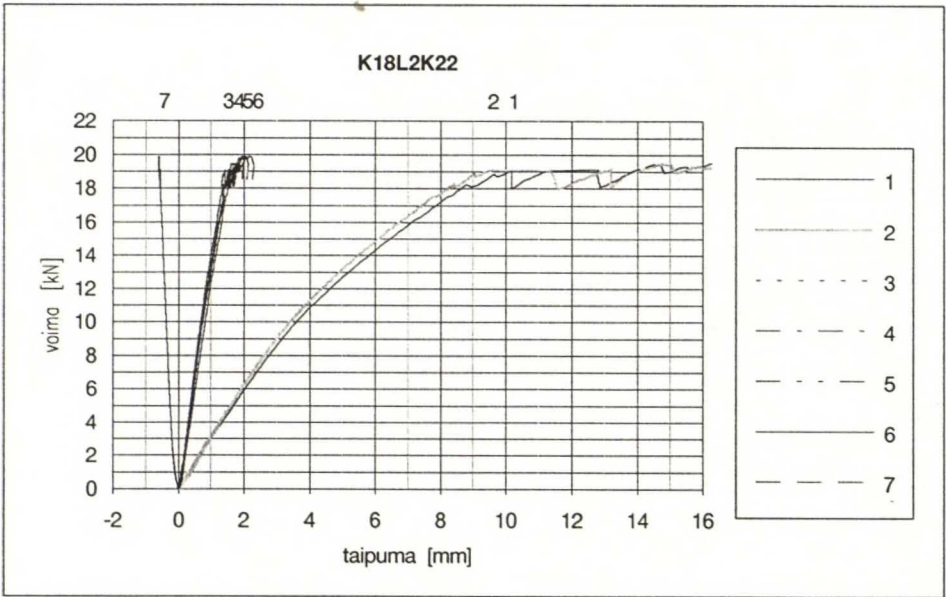
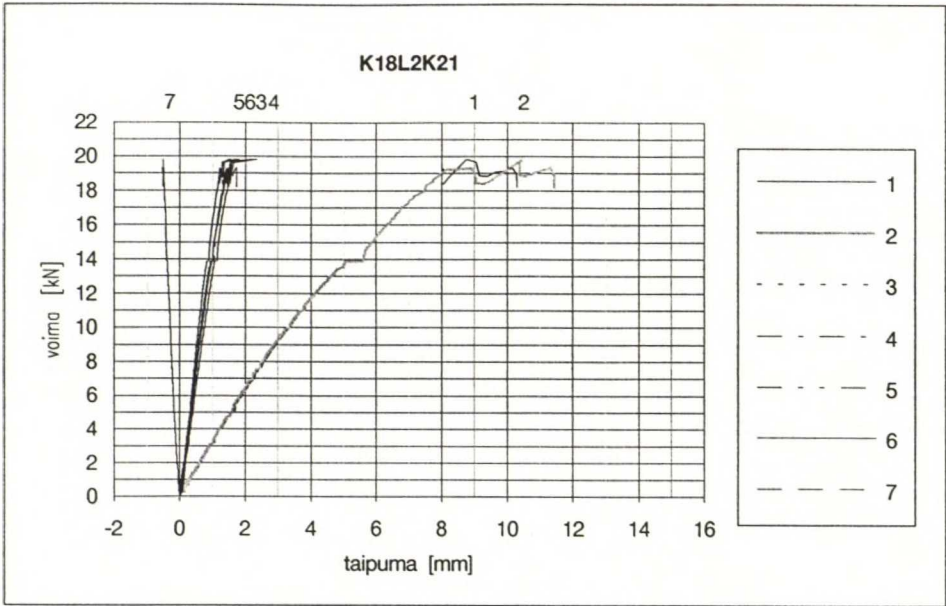


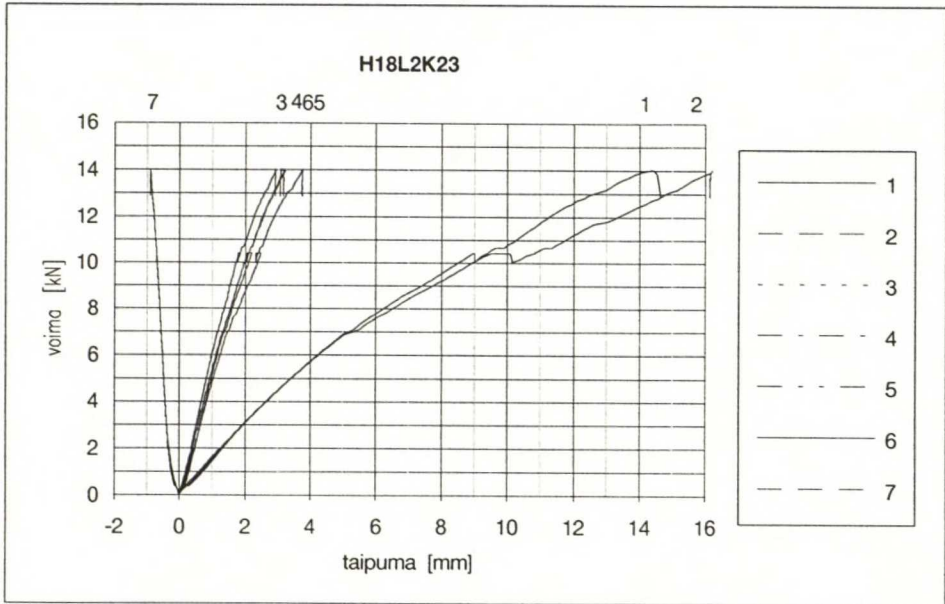
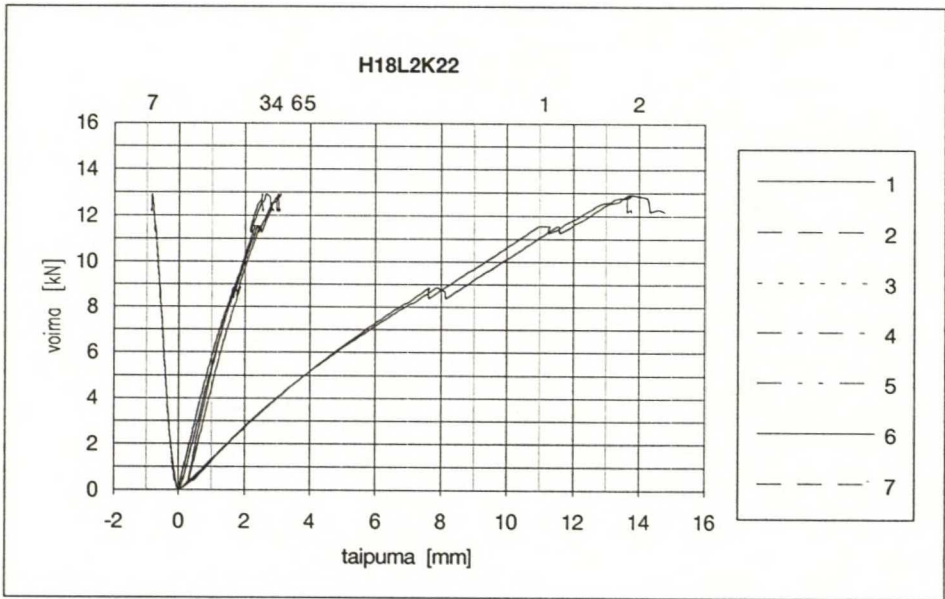
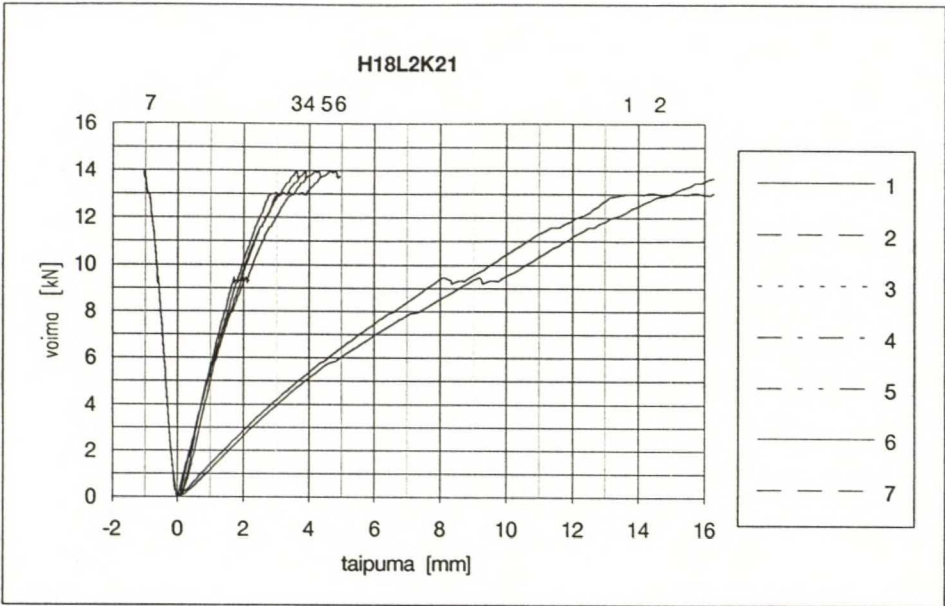
K12L3K21-3
H12L3K21-3

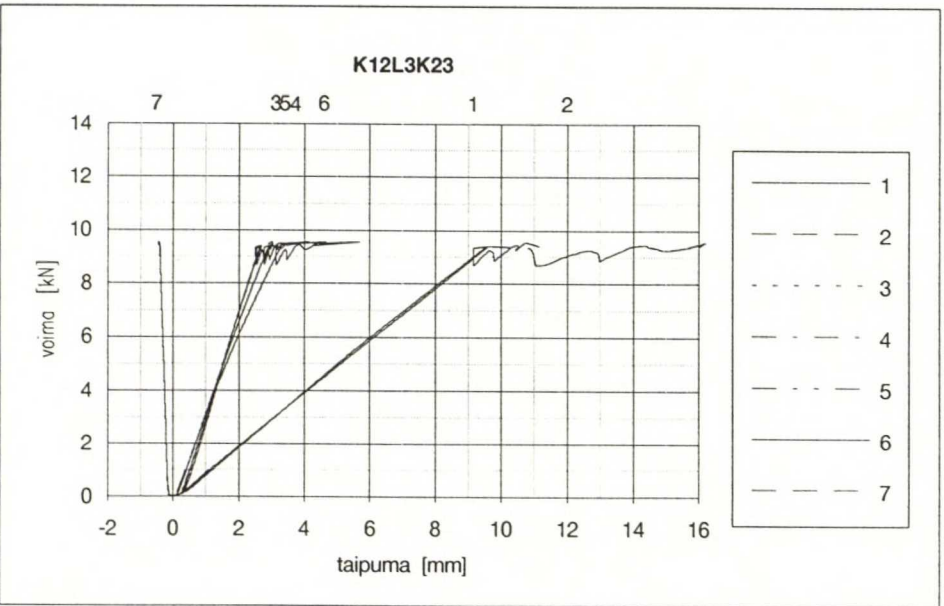
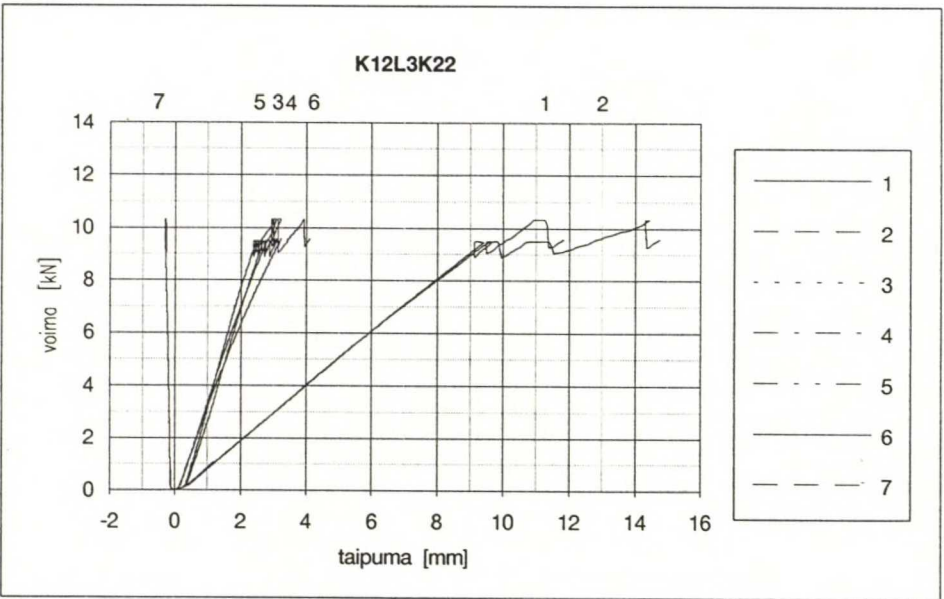
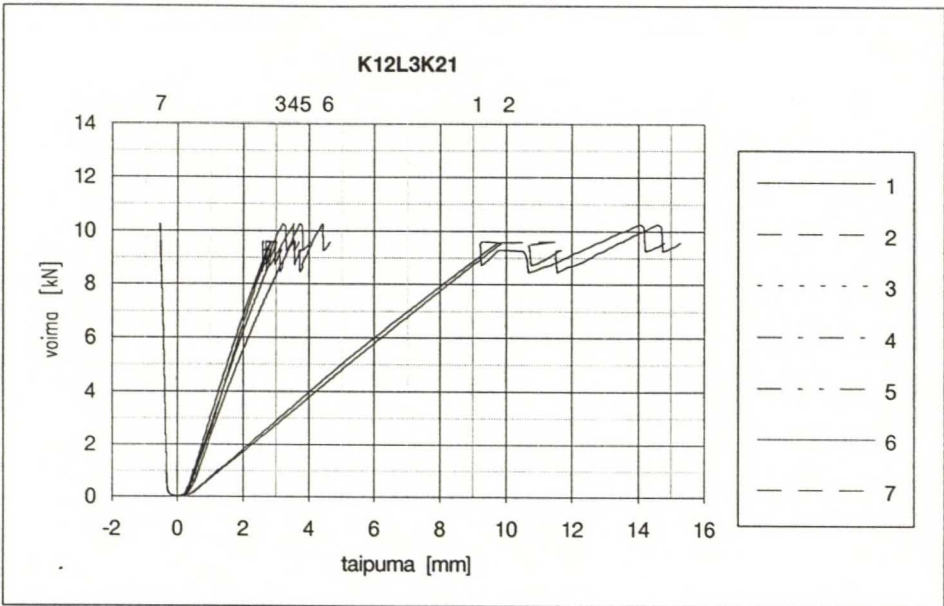


H18L2K24-6
K18L2K24-6
5/6 *

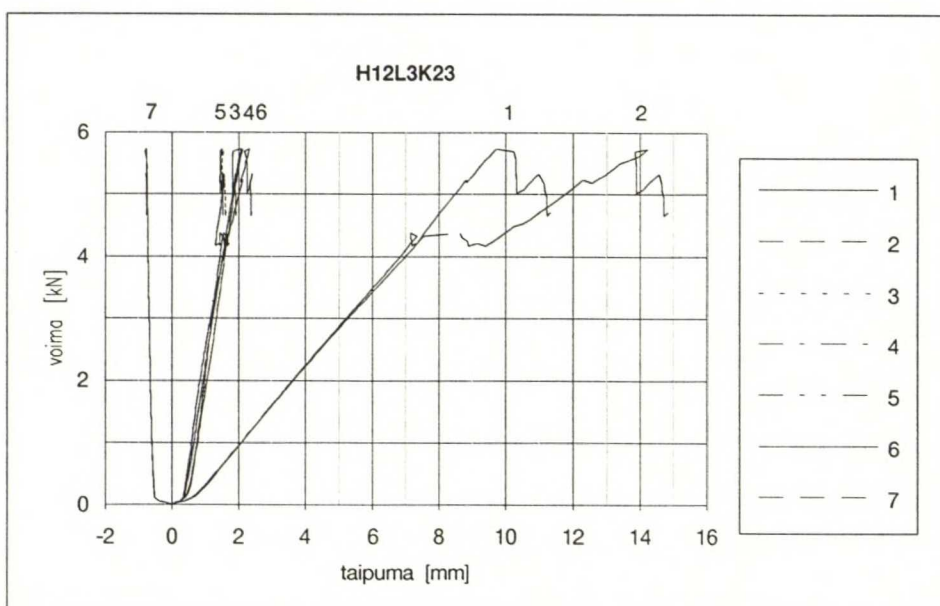
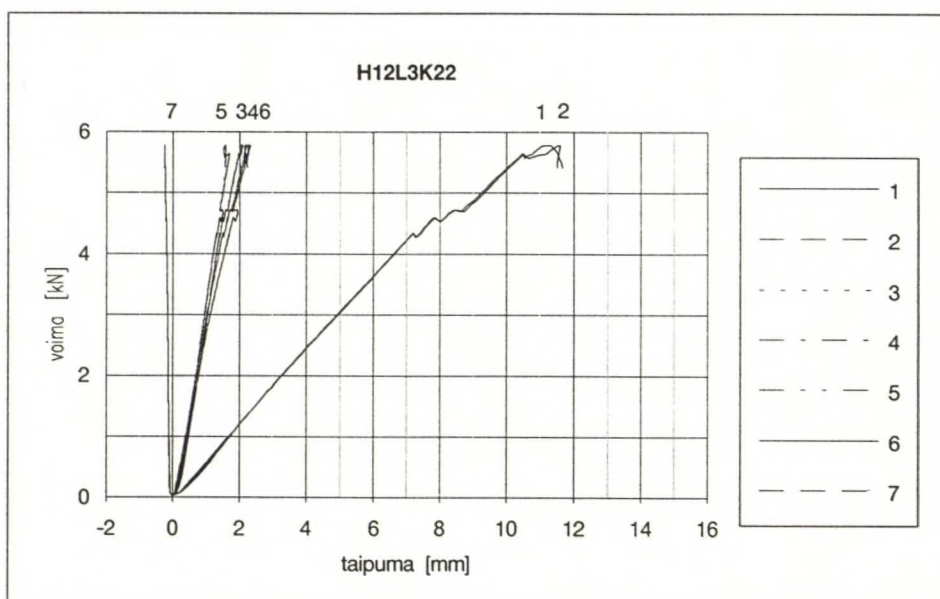
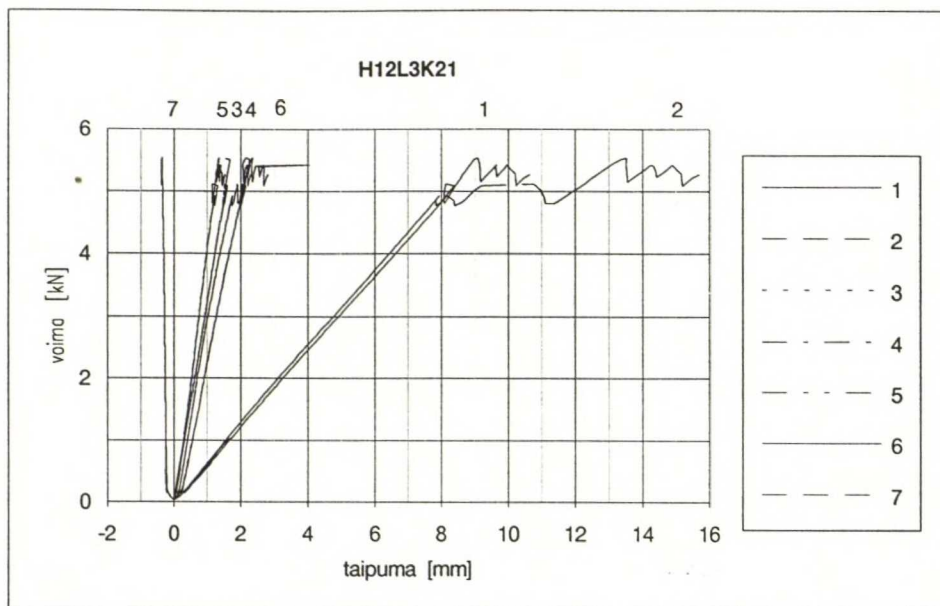


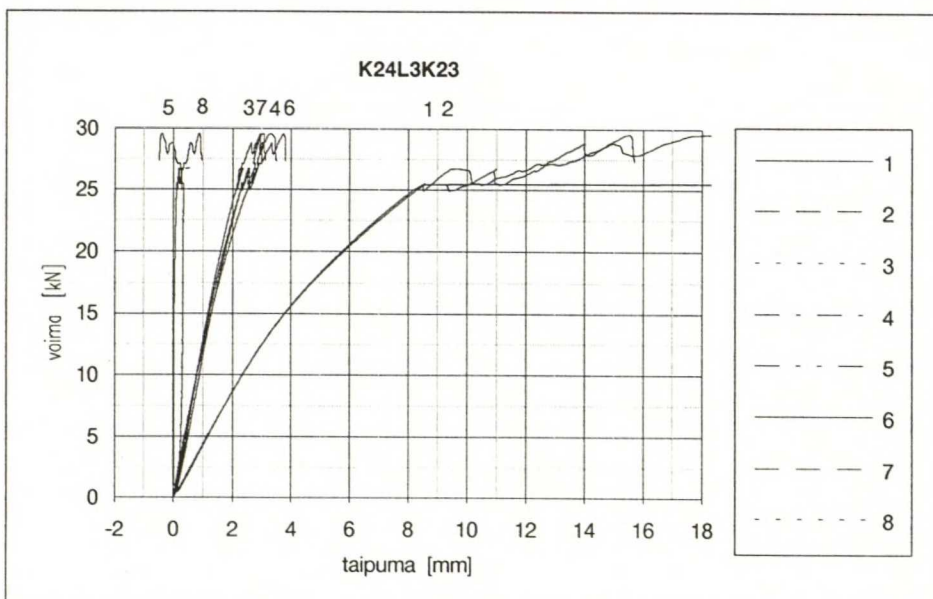
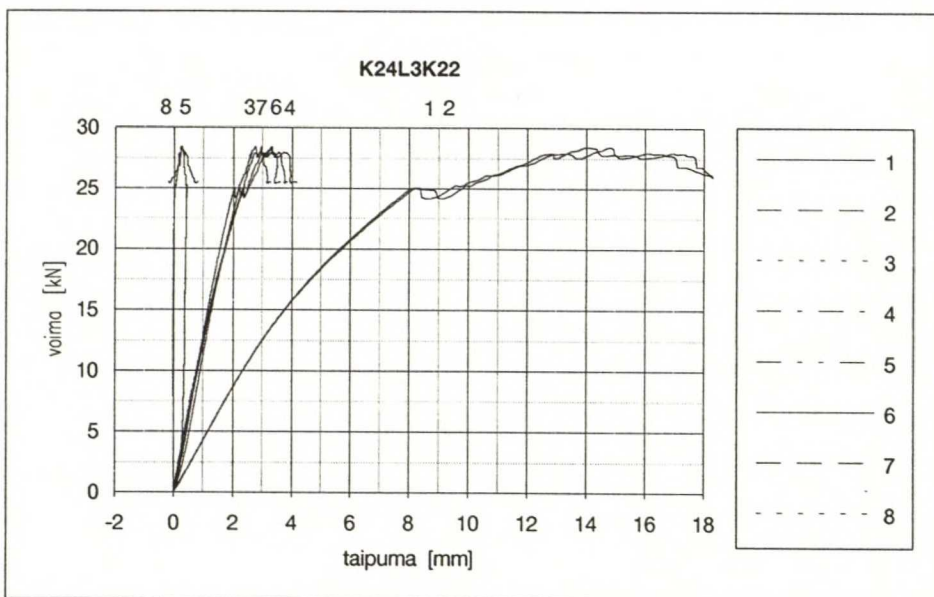
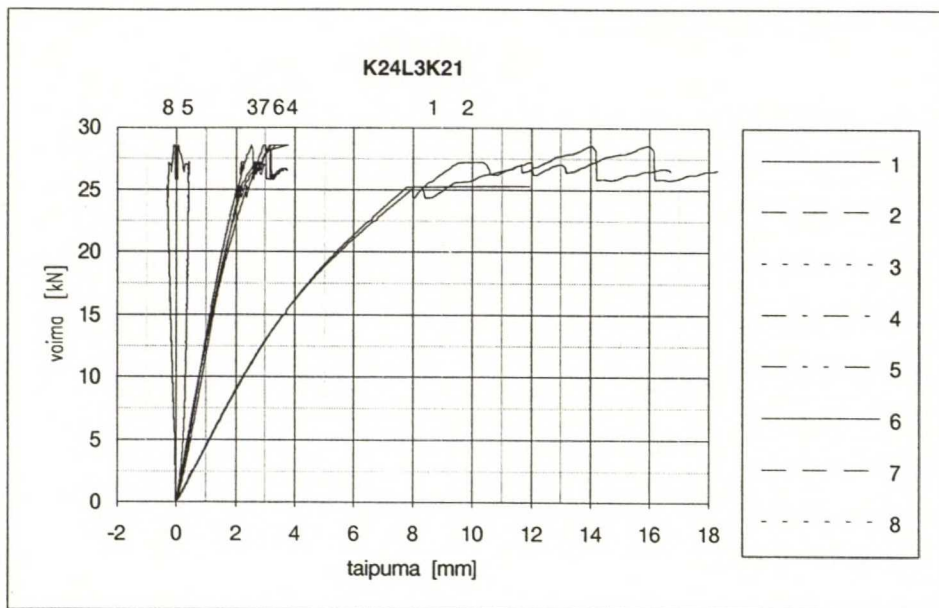


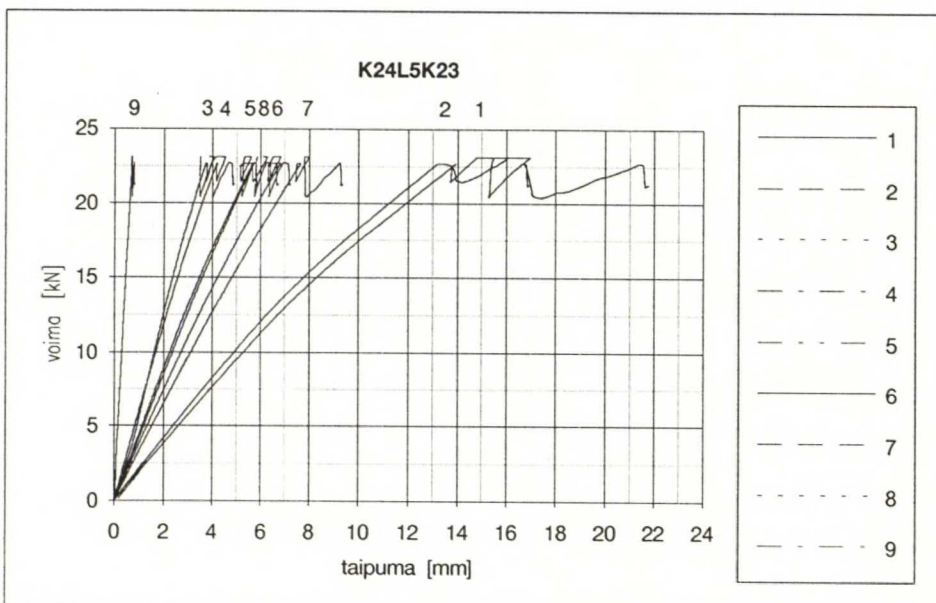
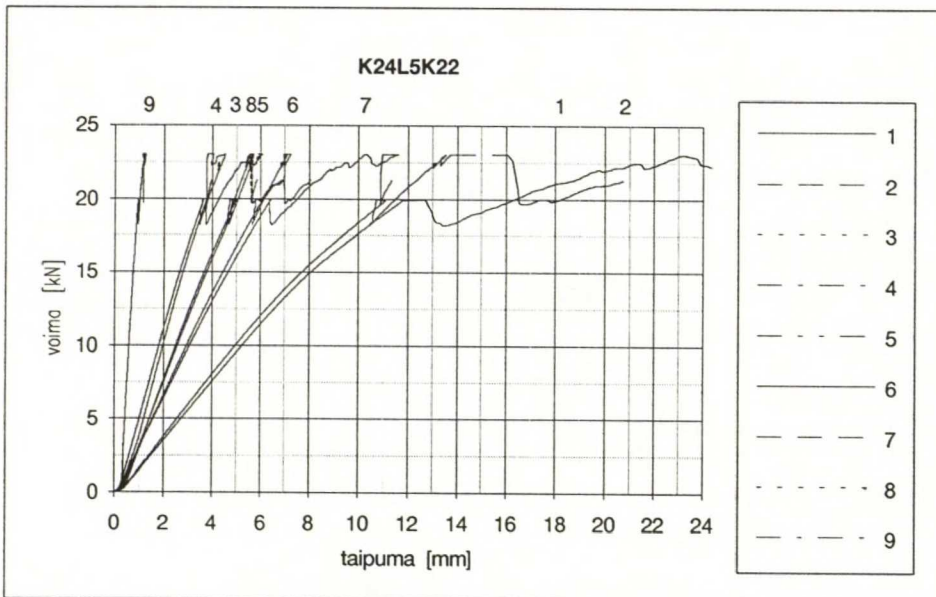
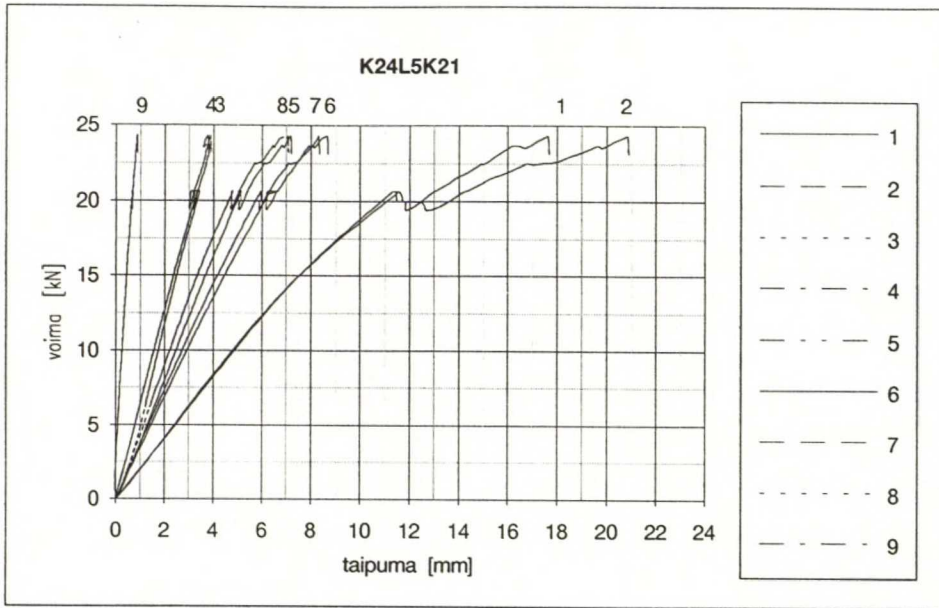




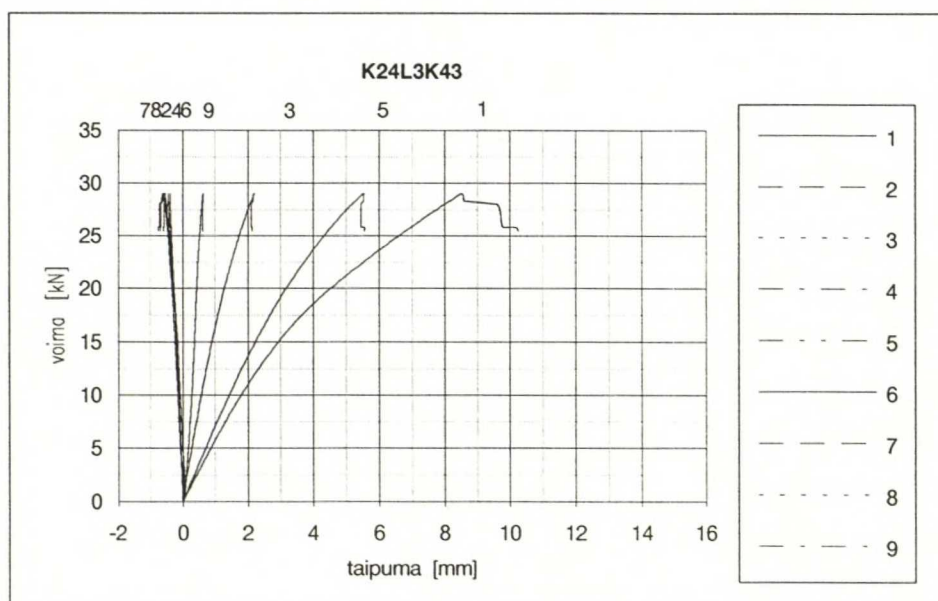
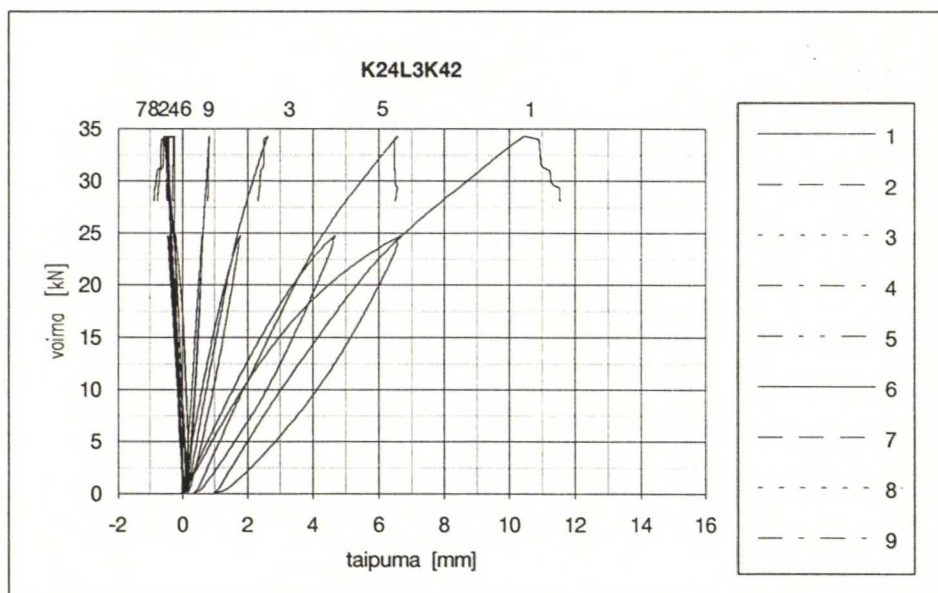
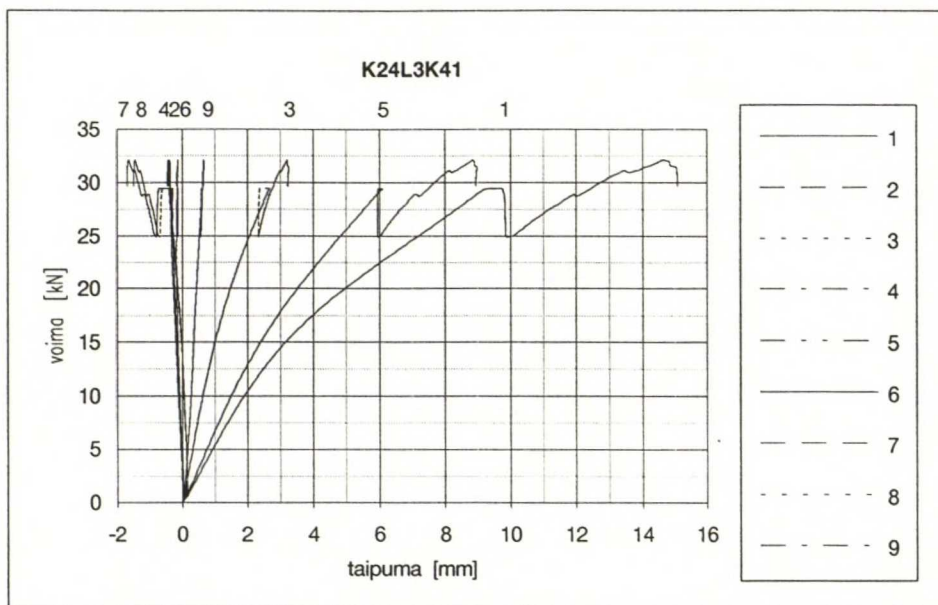
H12L3K21.XLS



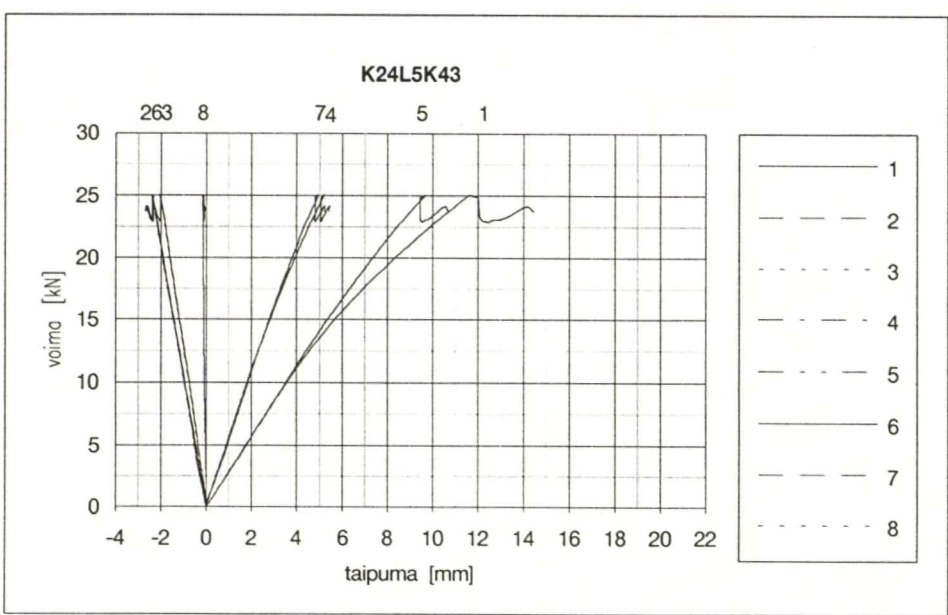
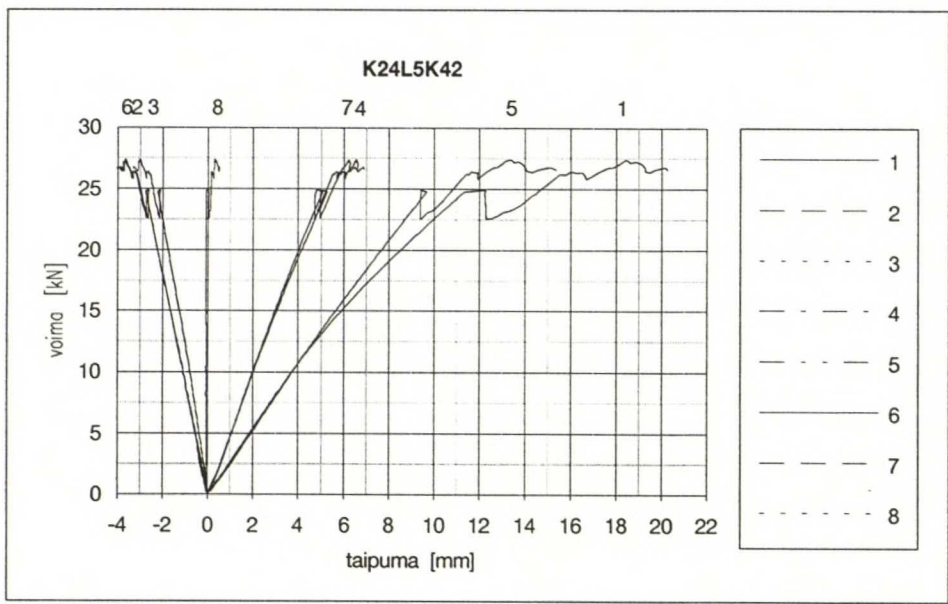
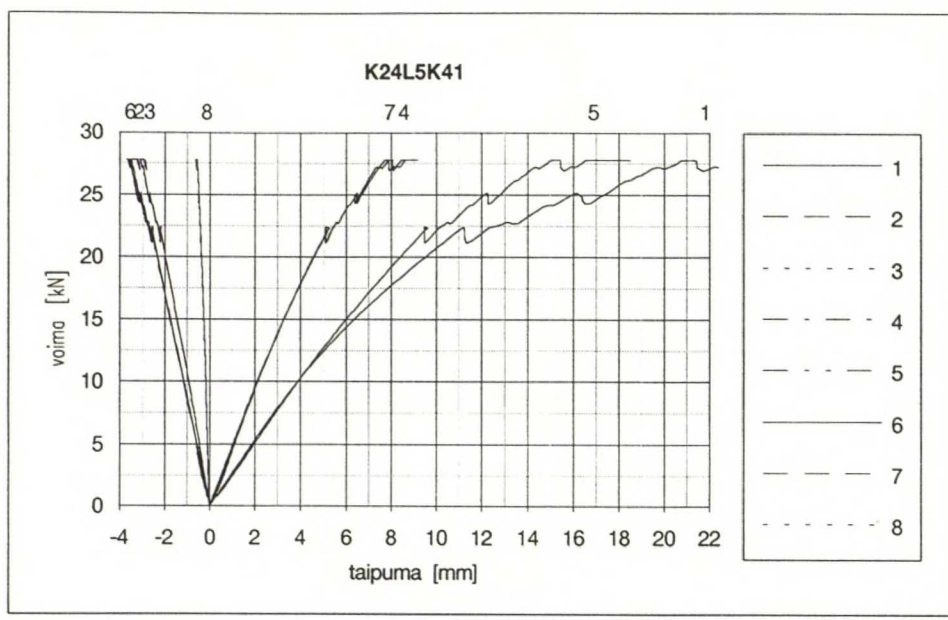


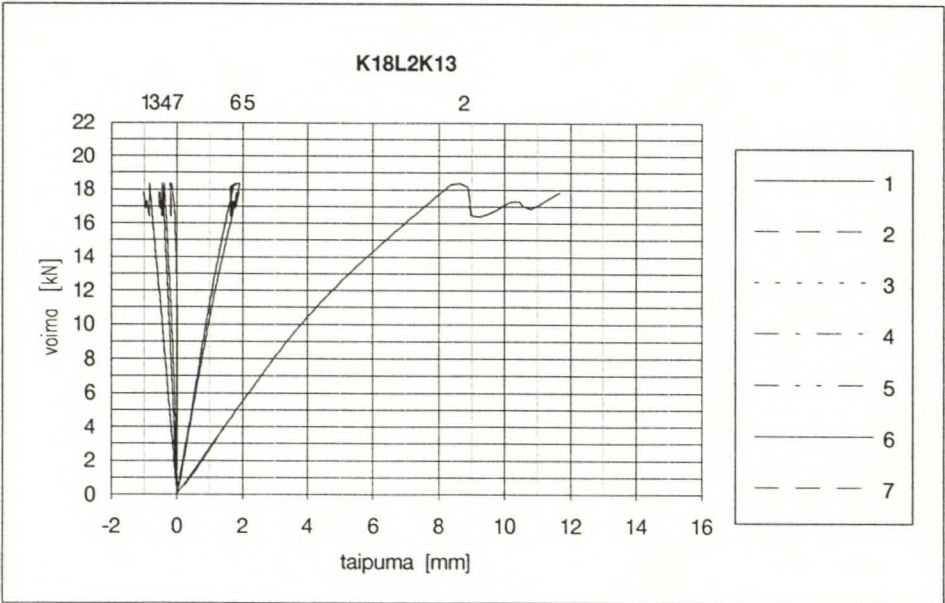
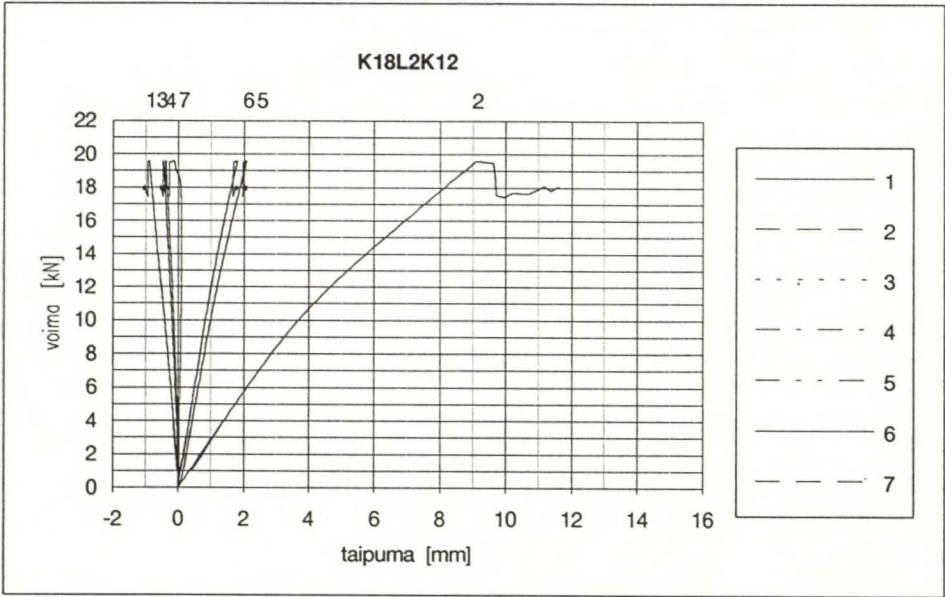
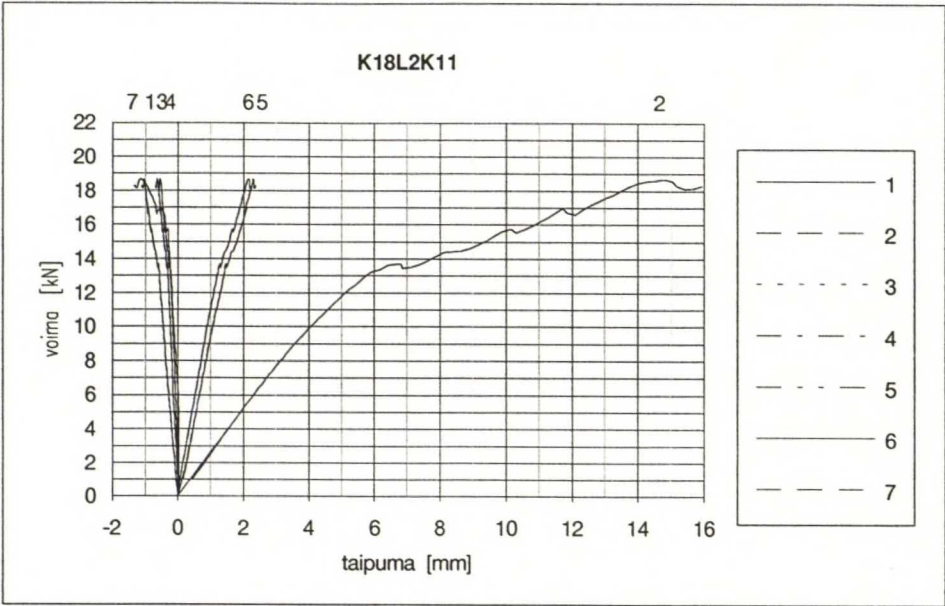


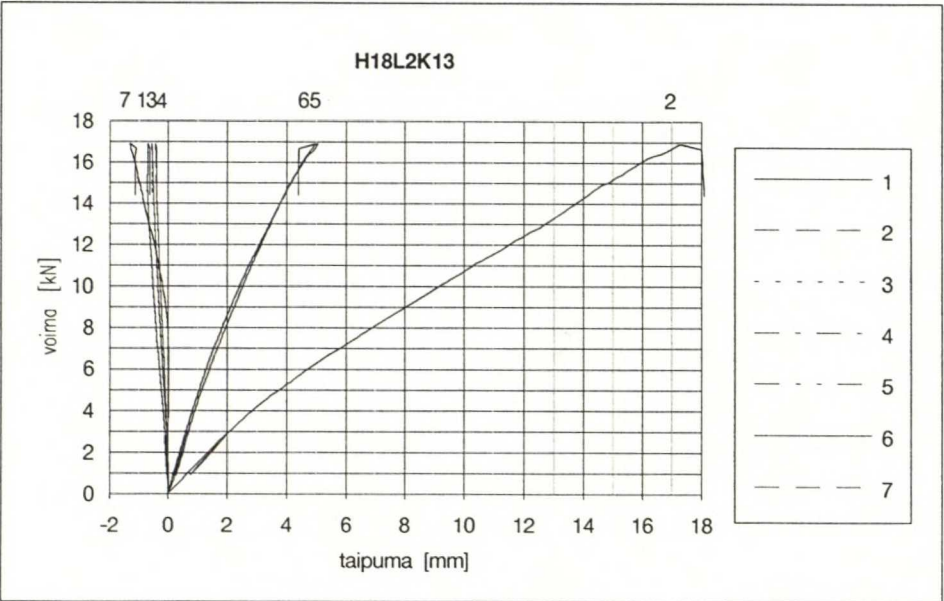
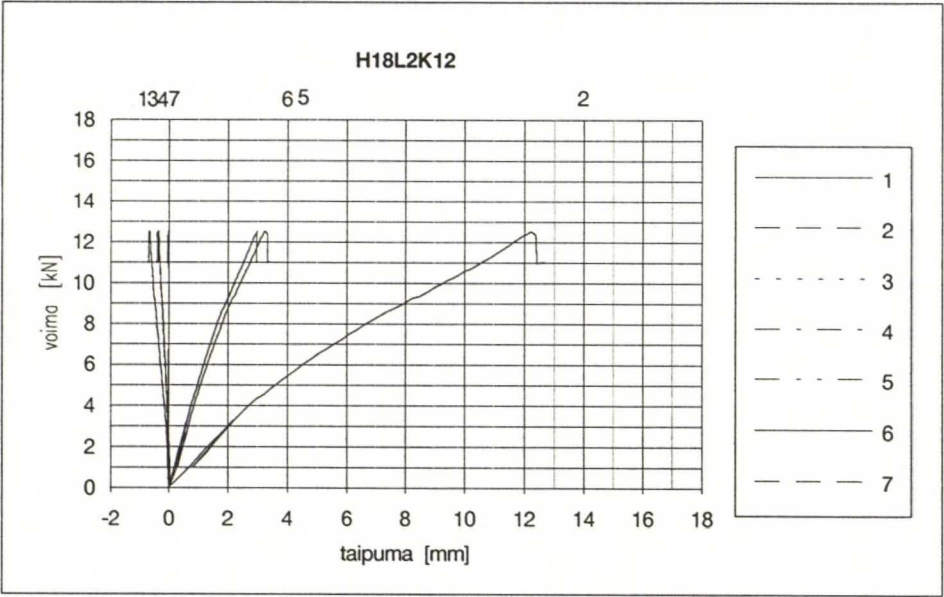
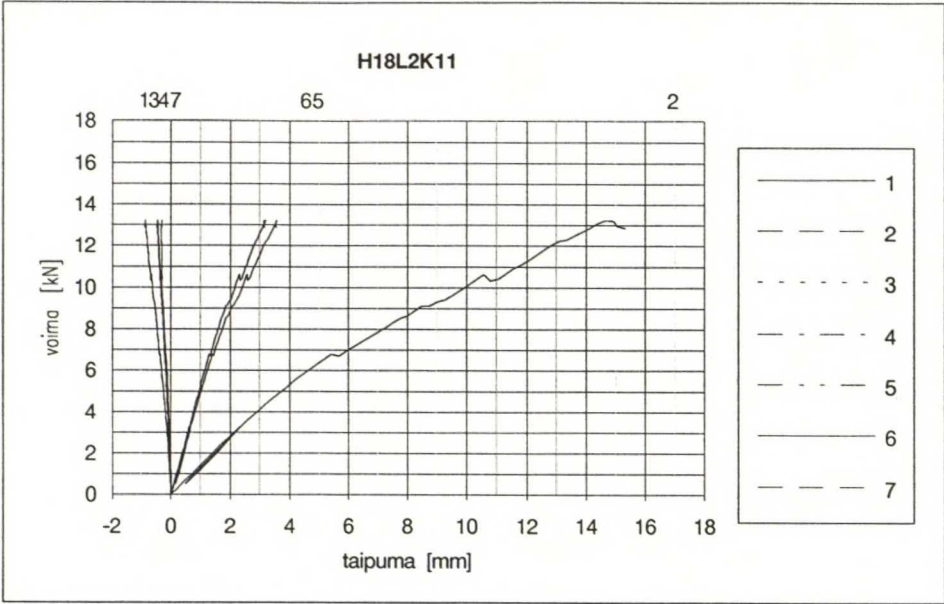
K24L3K41.XLS

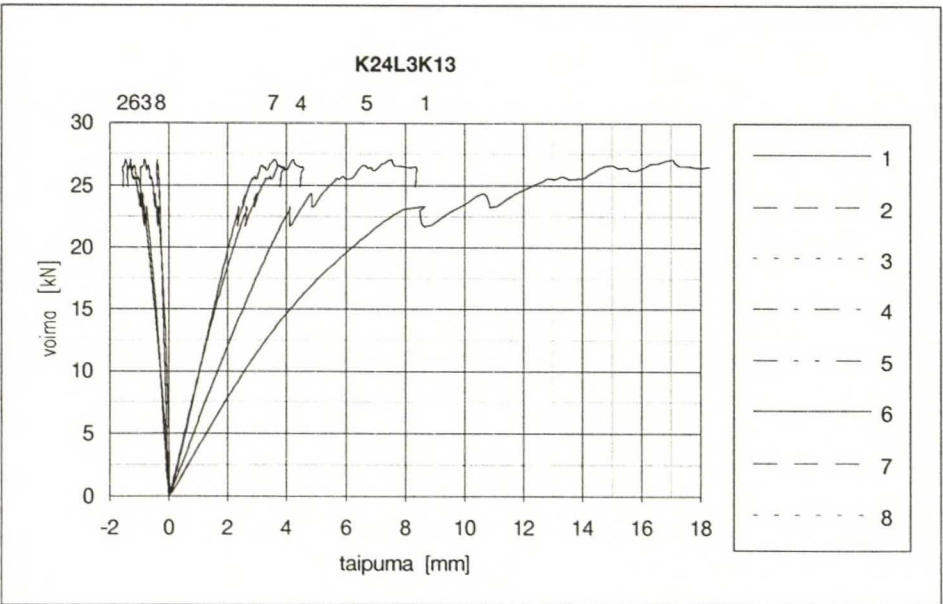
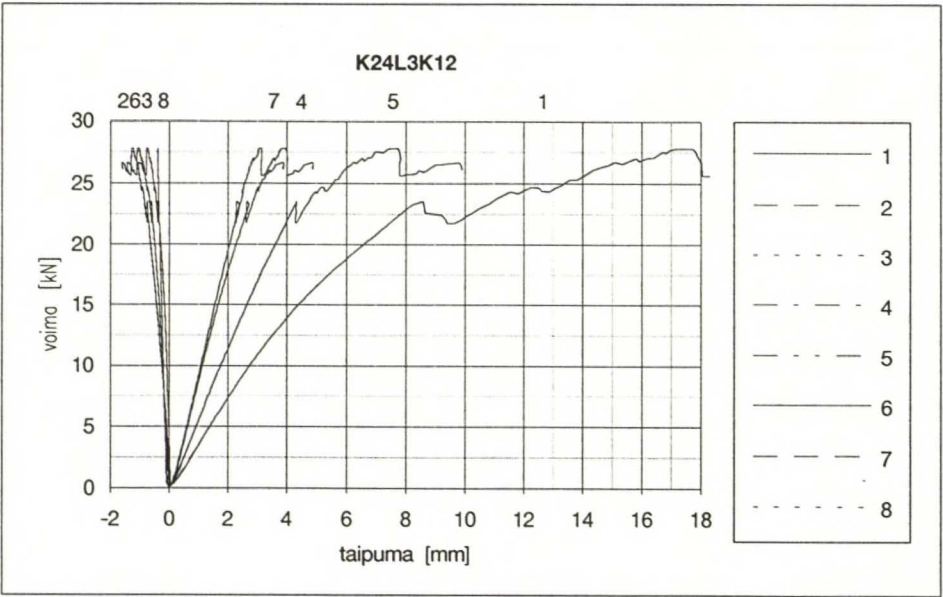
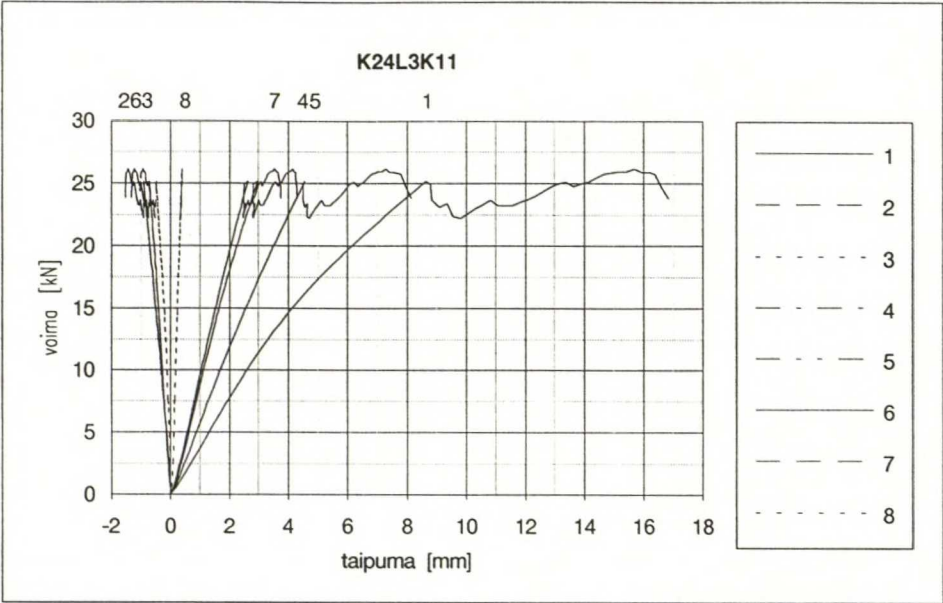


K24L5K41.XLS

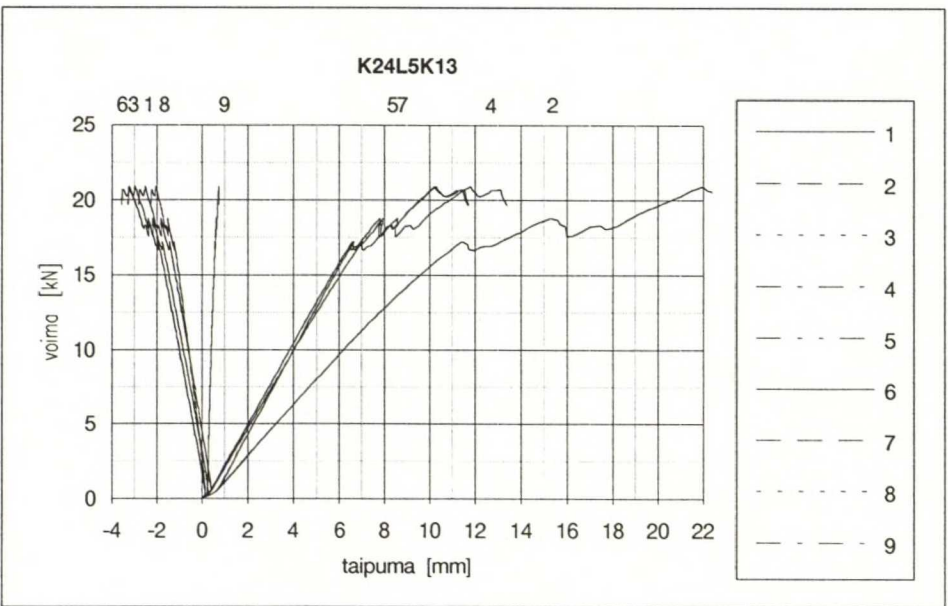
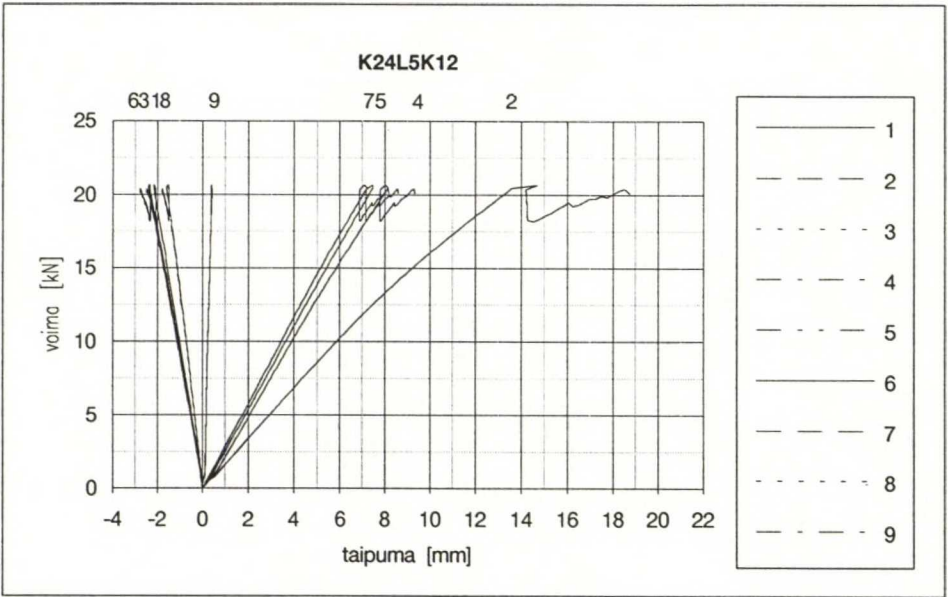
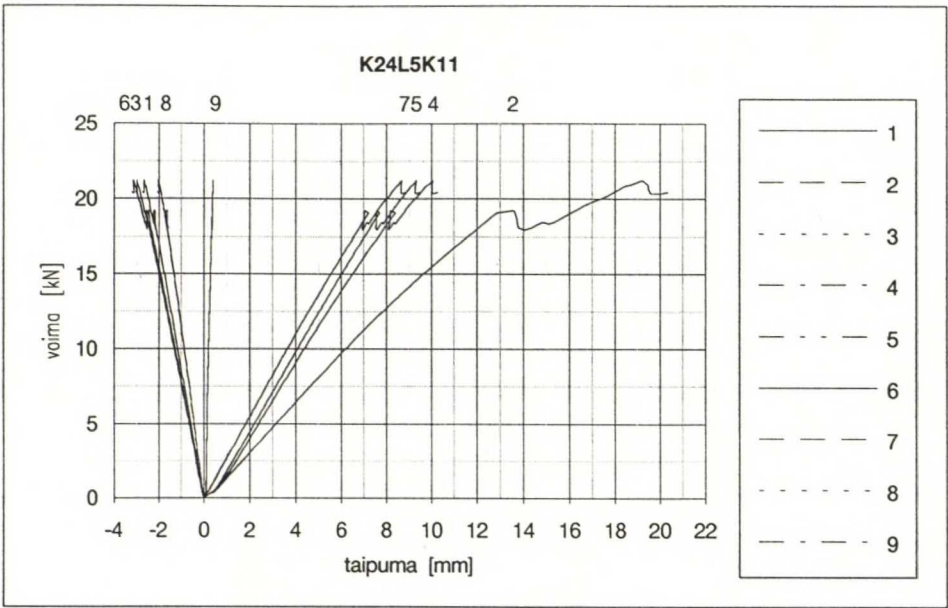




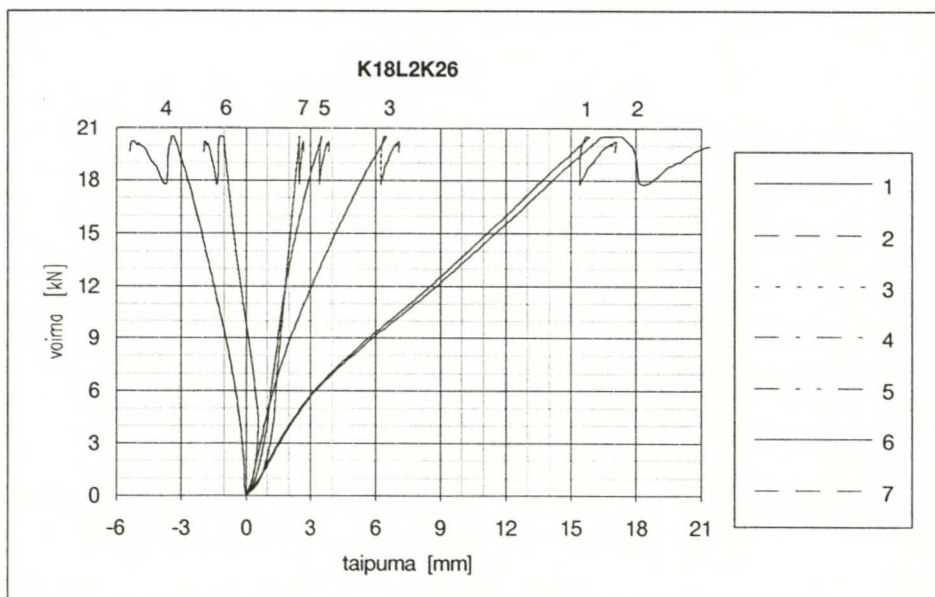
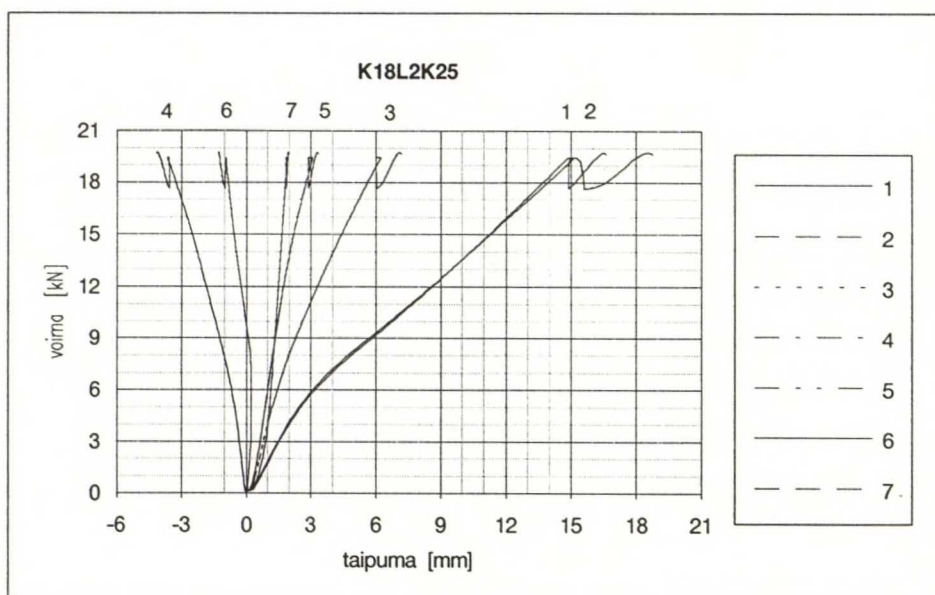
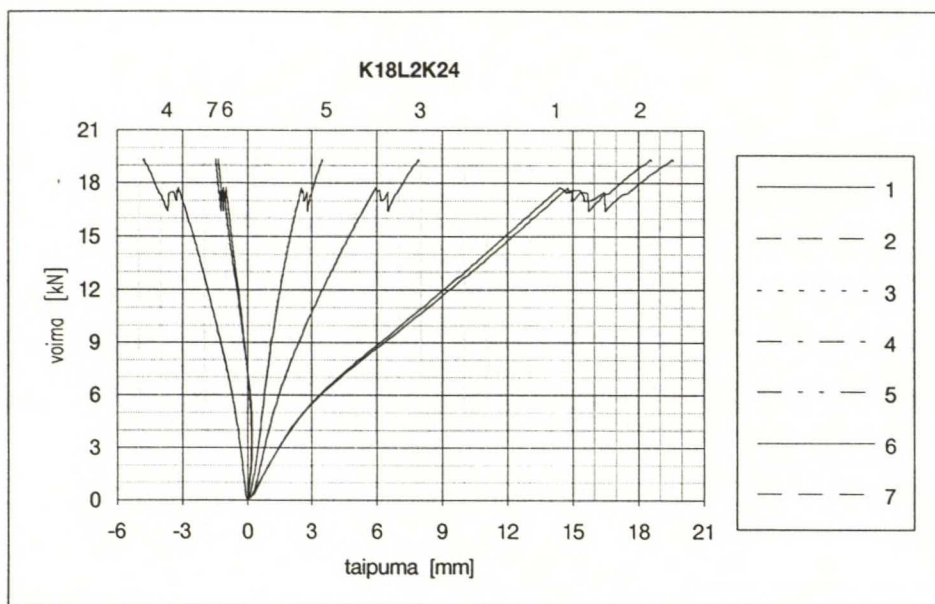


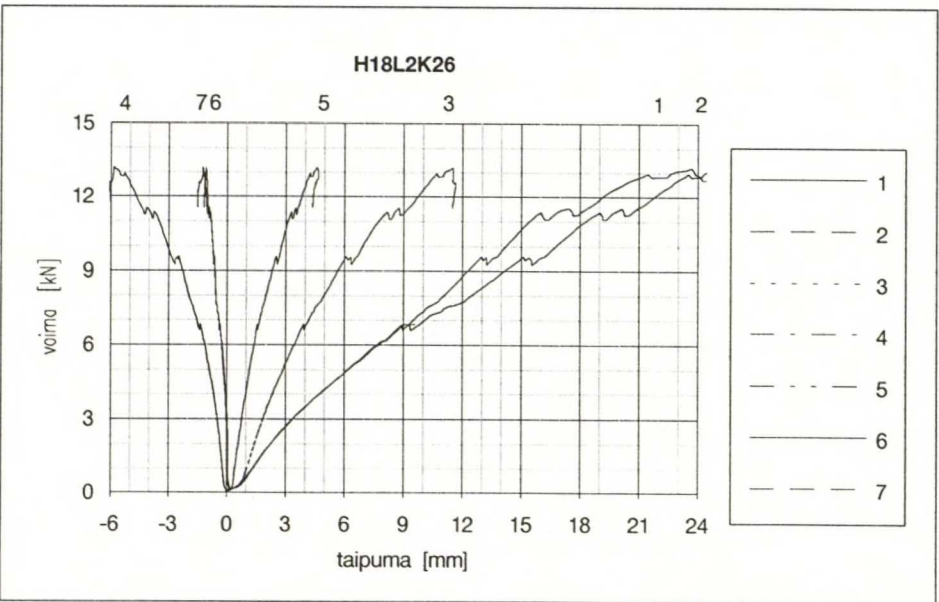
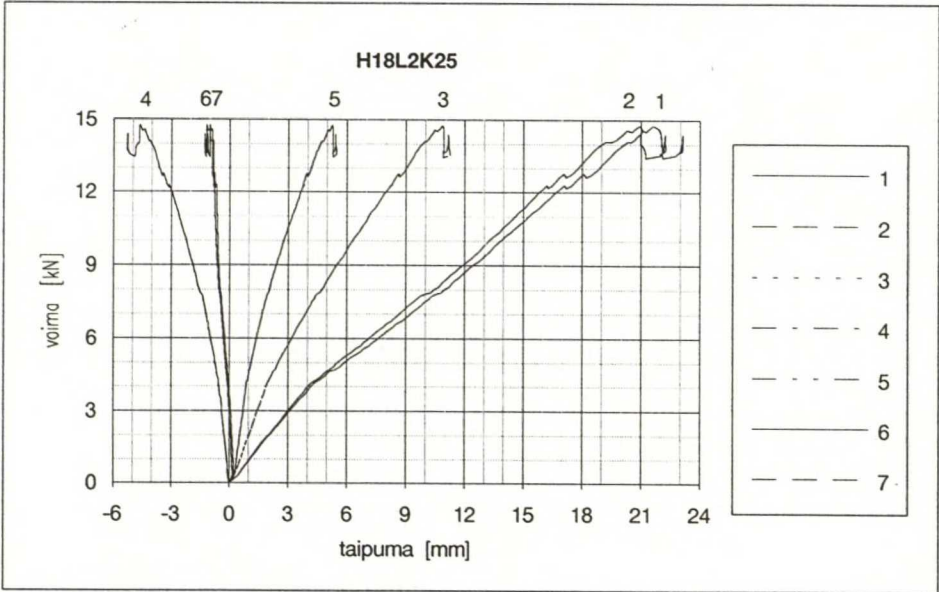
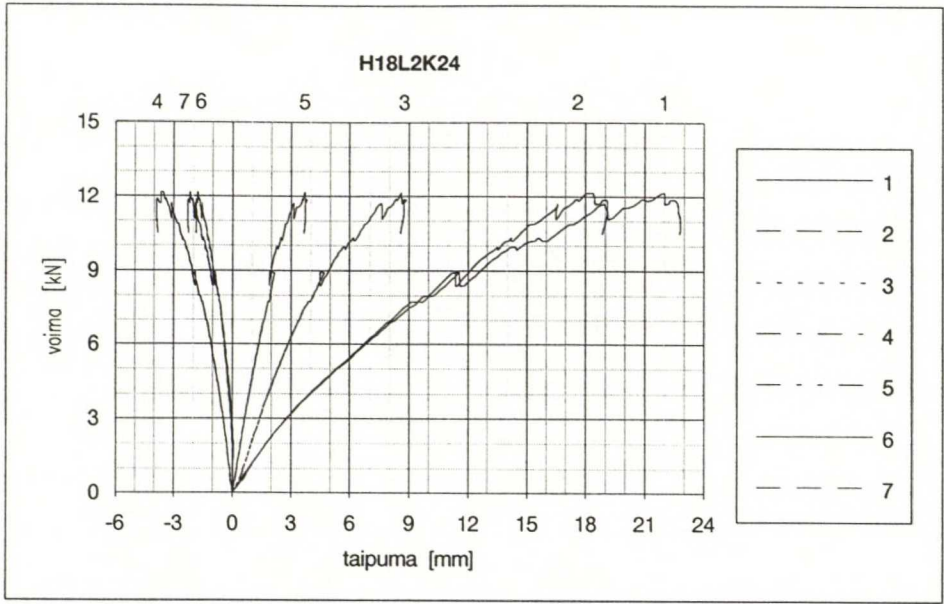


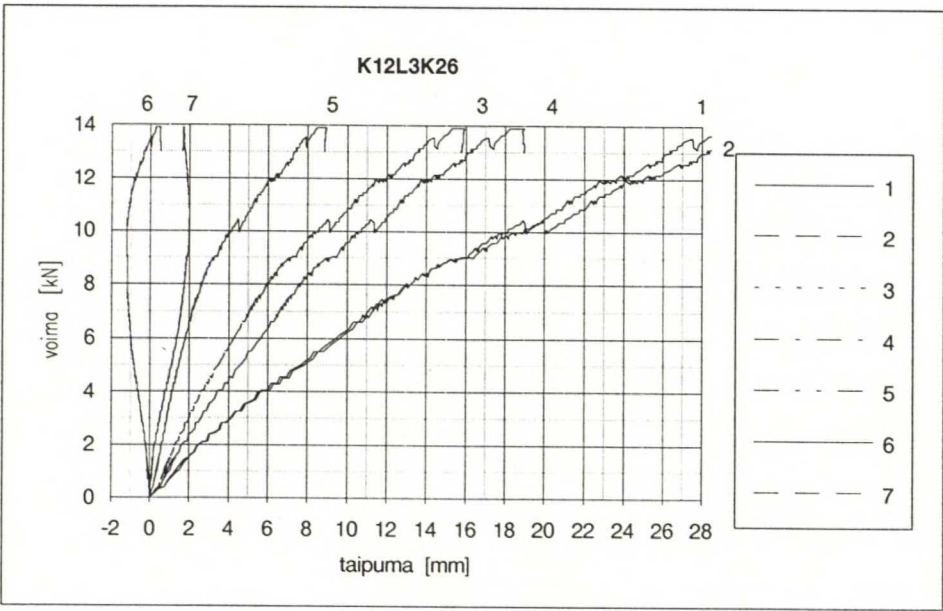
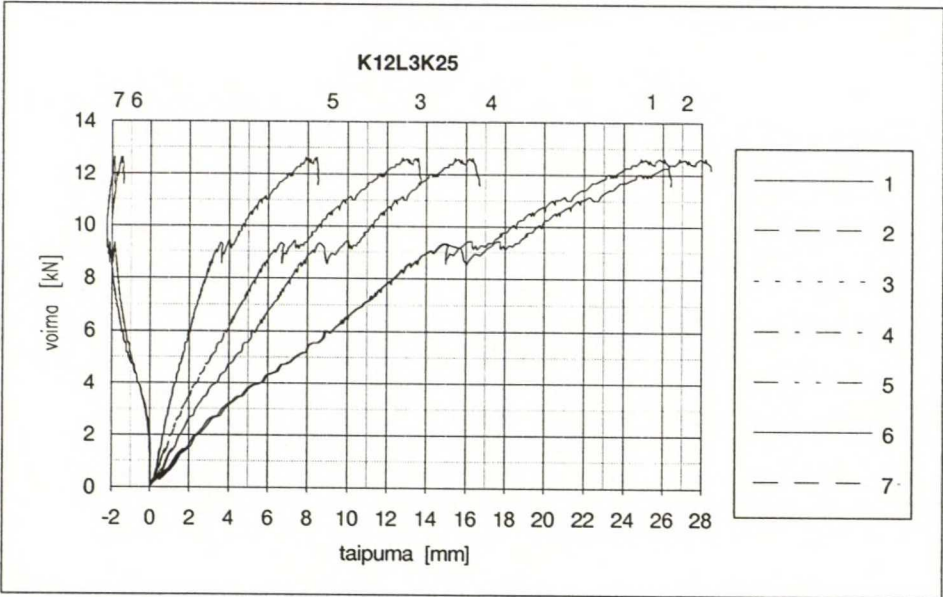
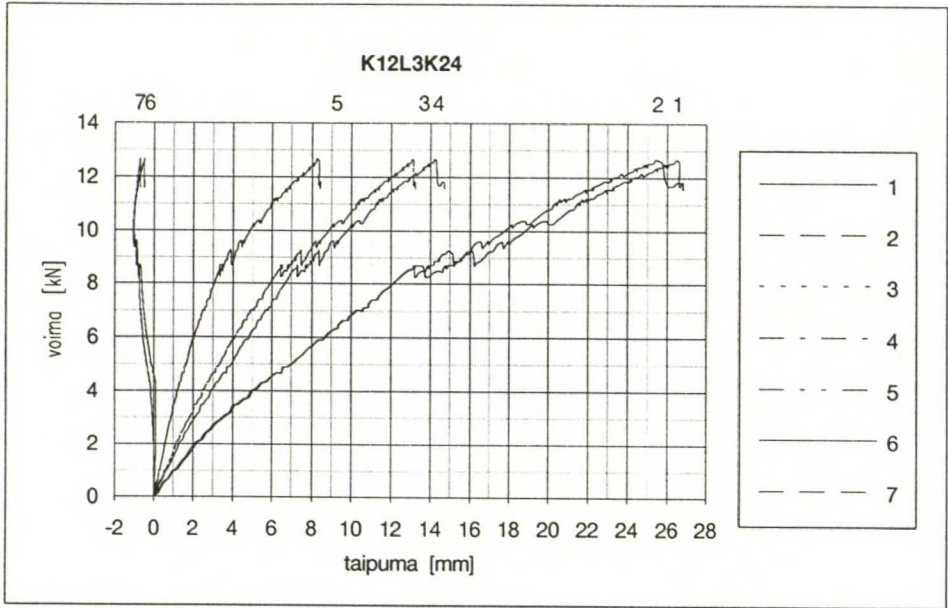
K24L5K11.XLS



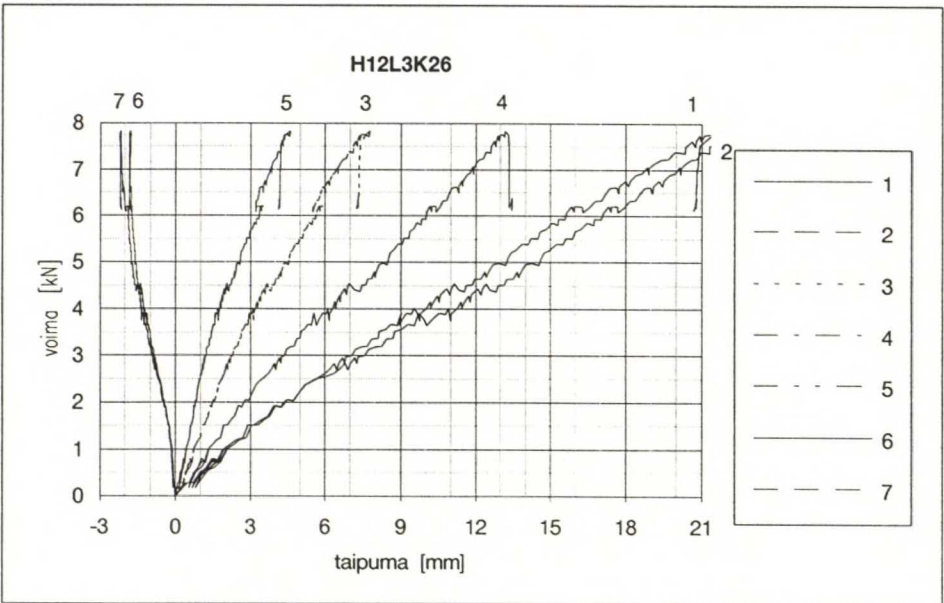
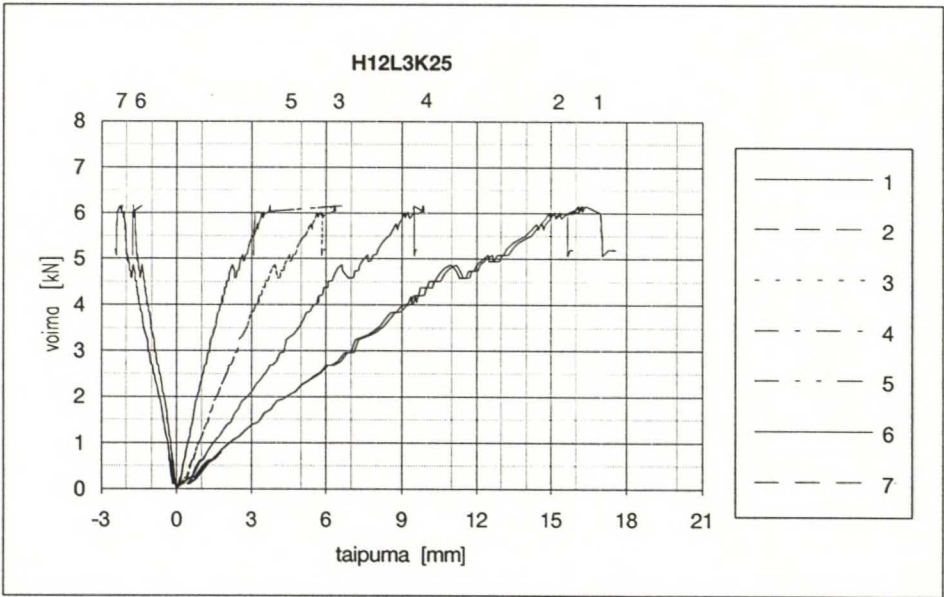
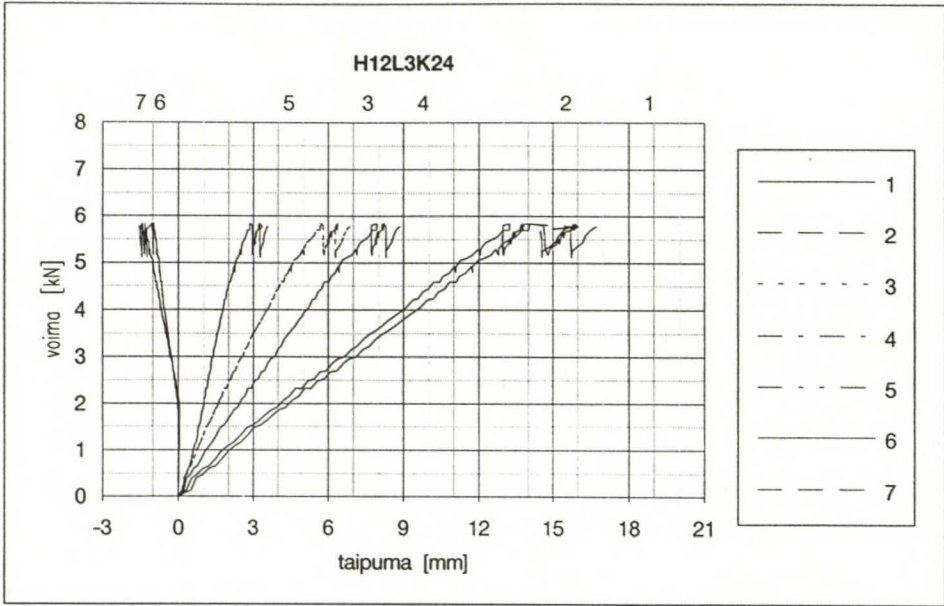
K18L2K24.XLS



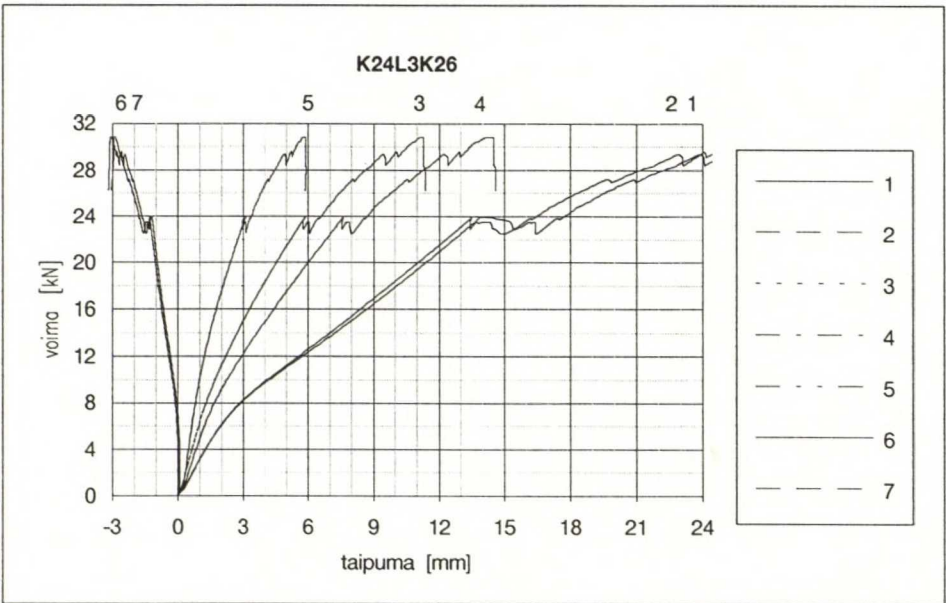
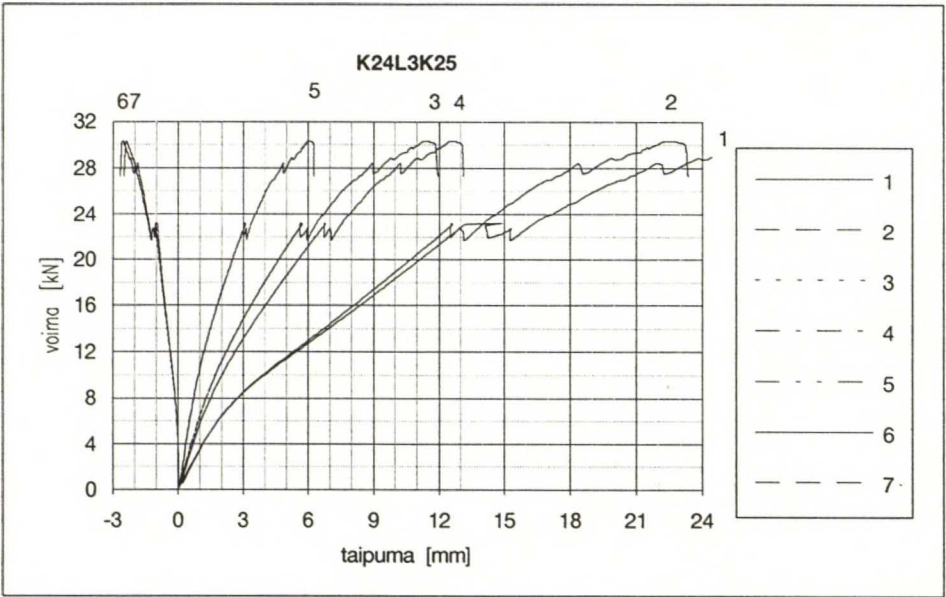
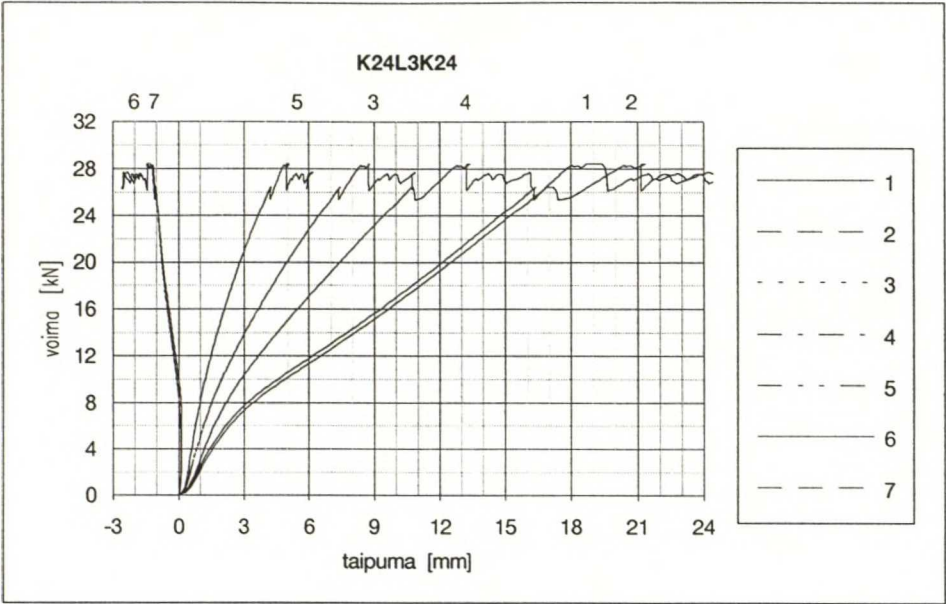


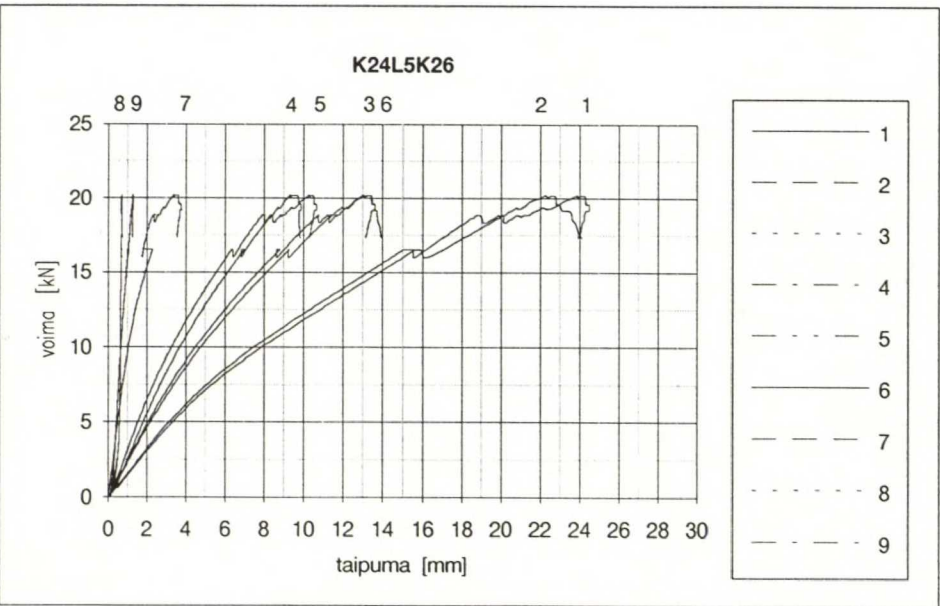
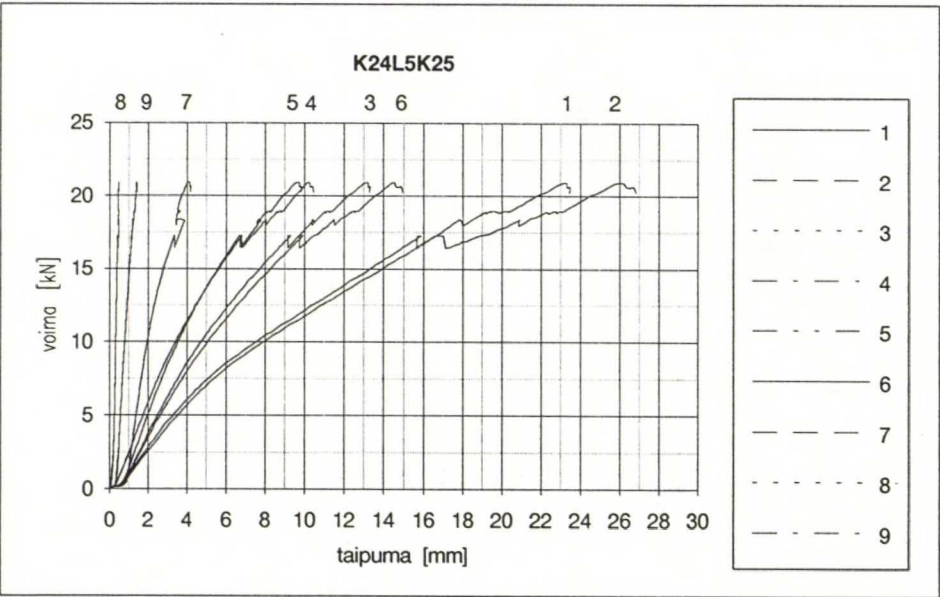
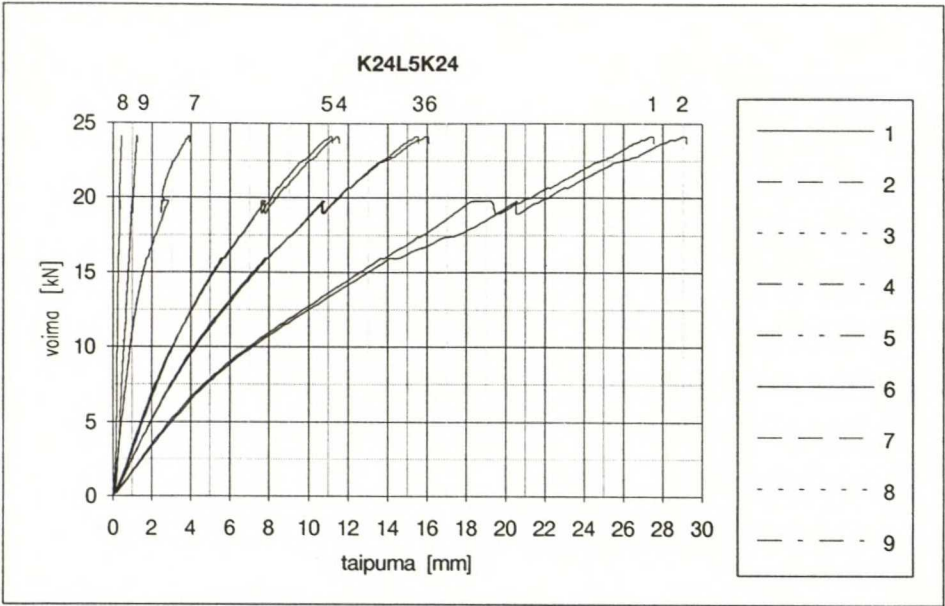


H12L3K24.XLS

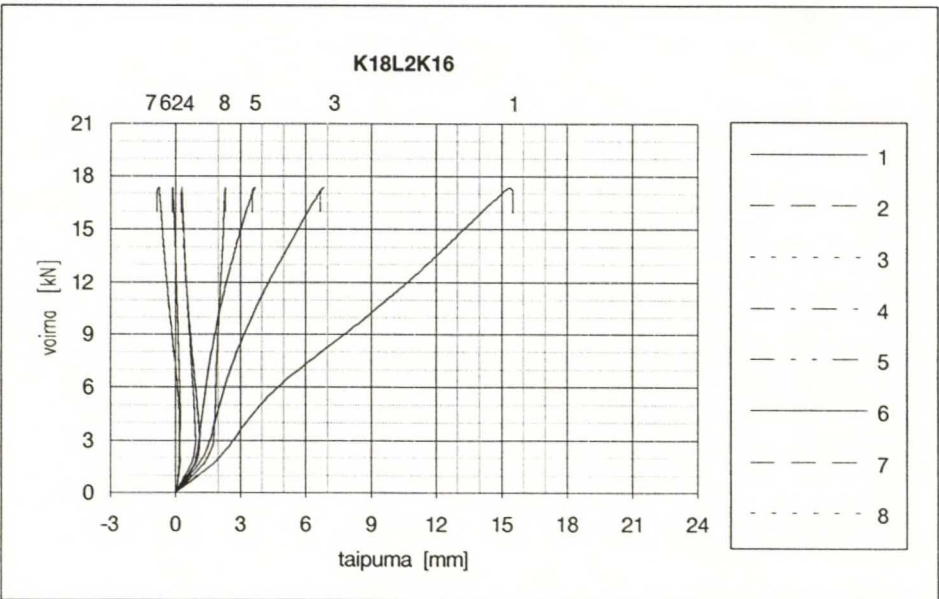
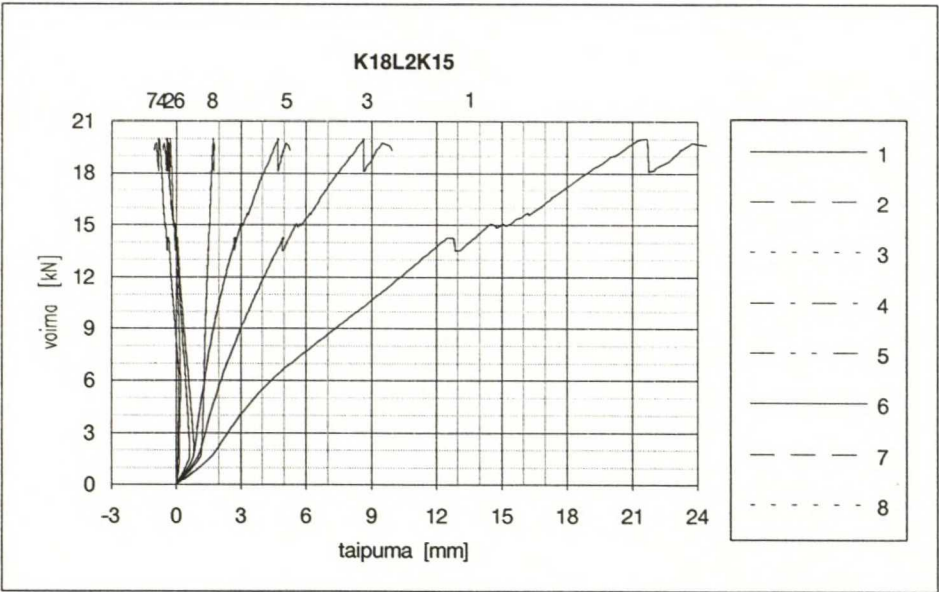
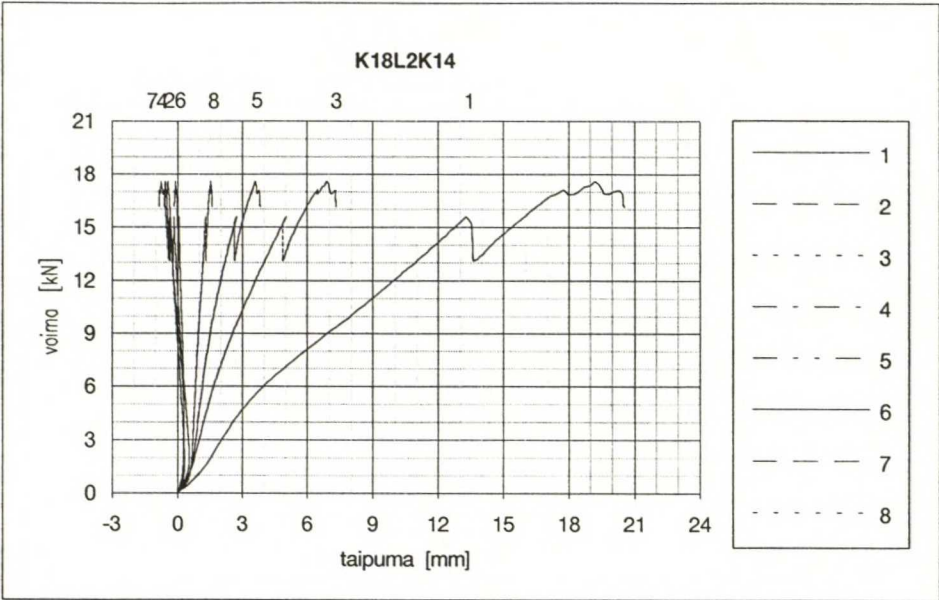


K24L3K24.XLS

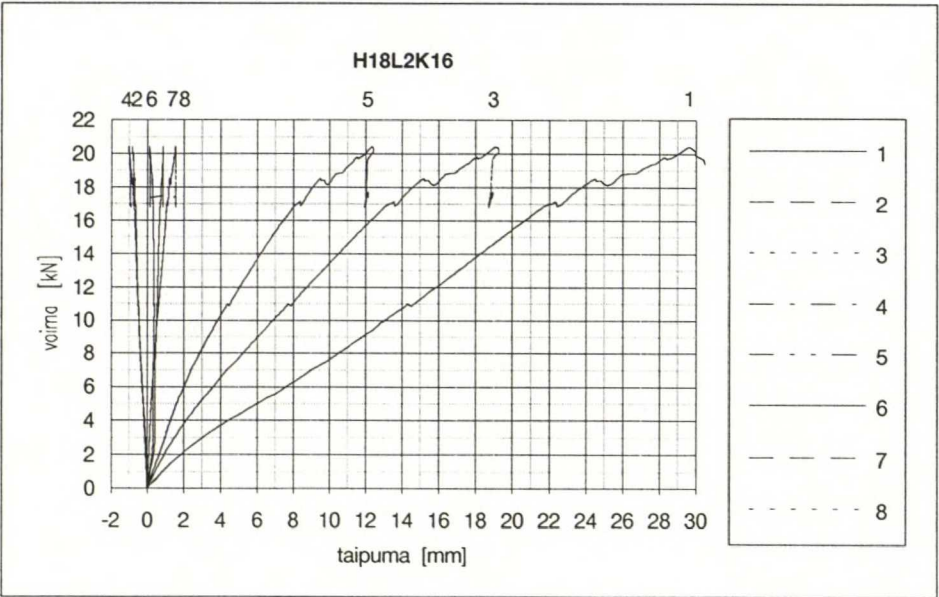
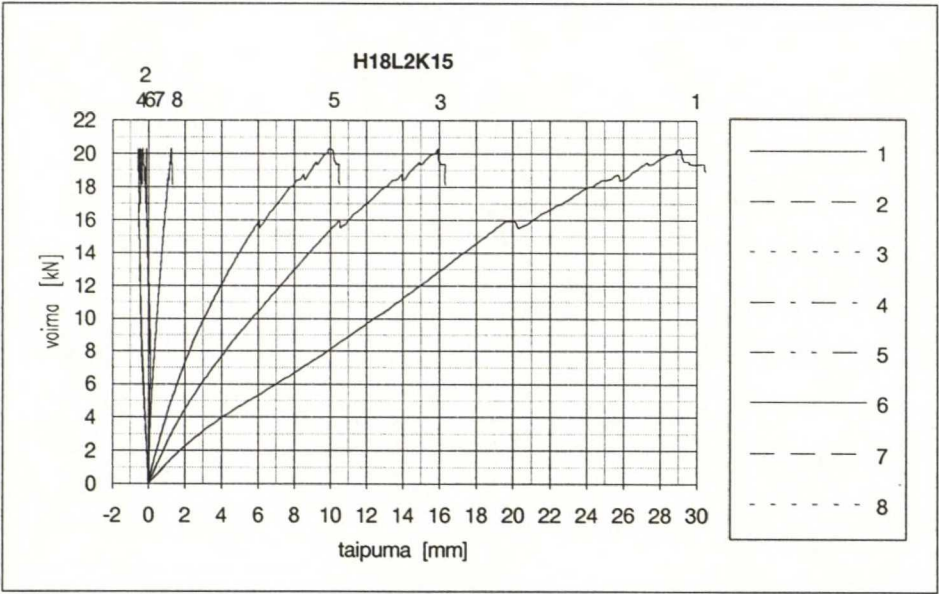
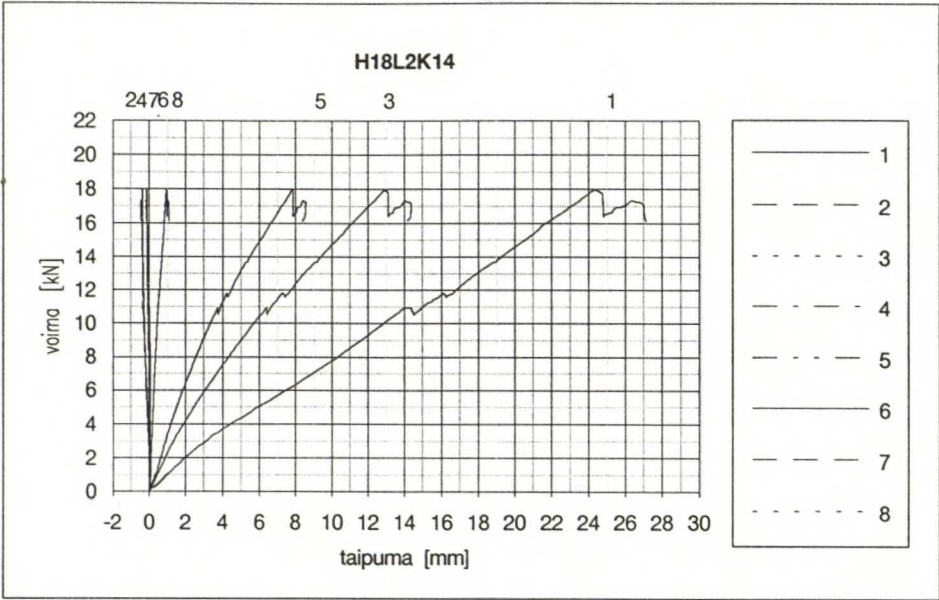




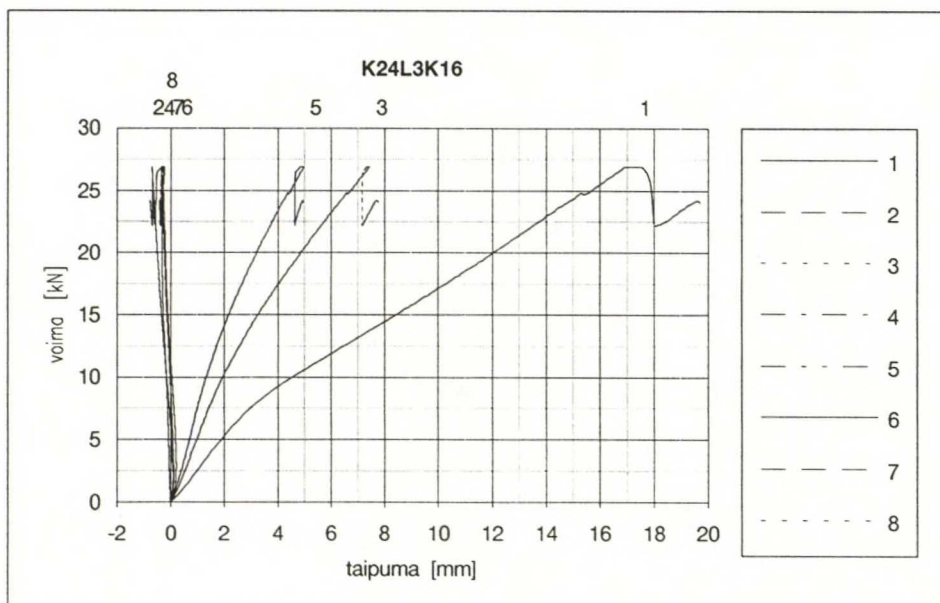
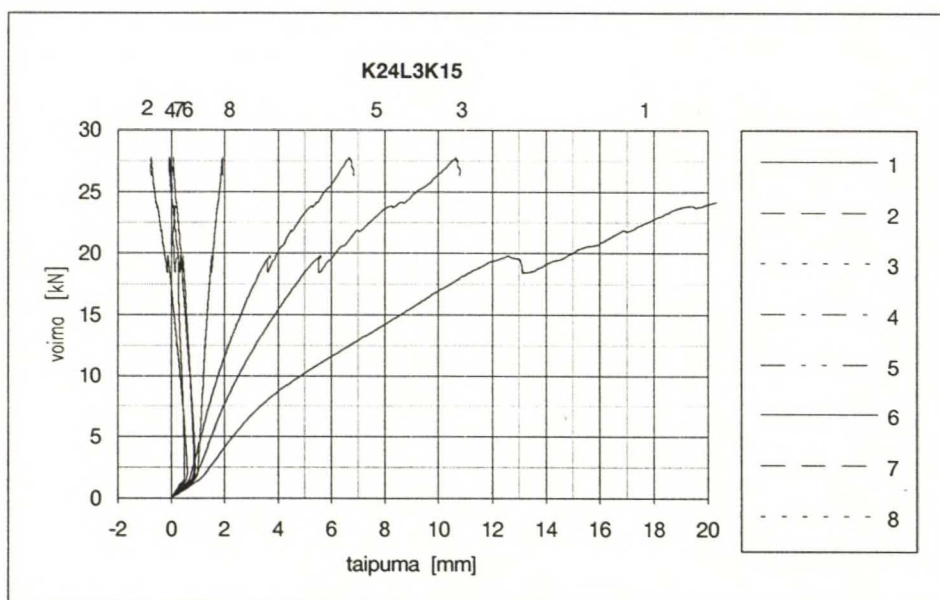
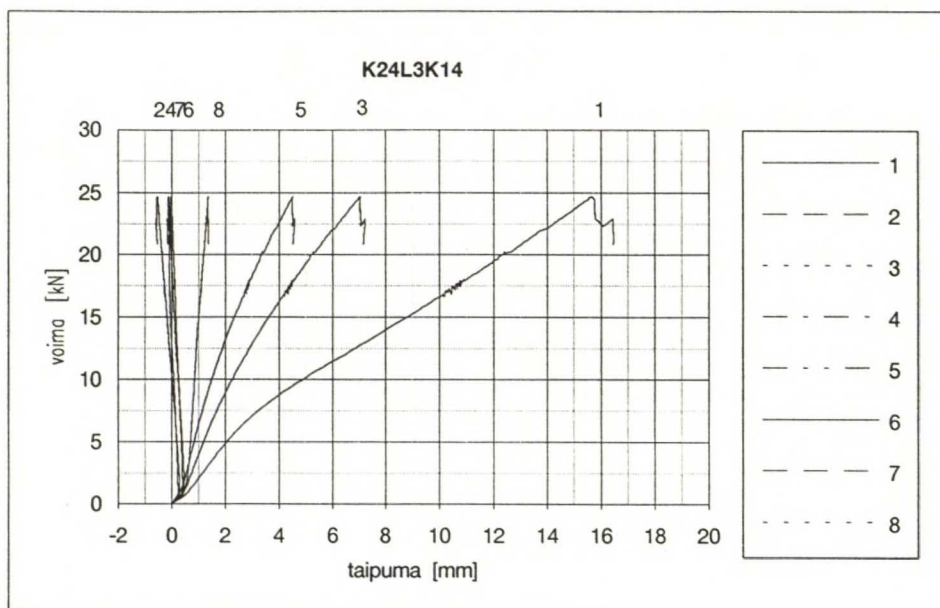
K18L2K14.XLS



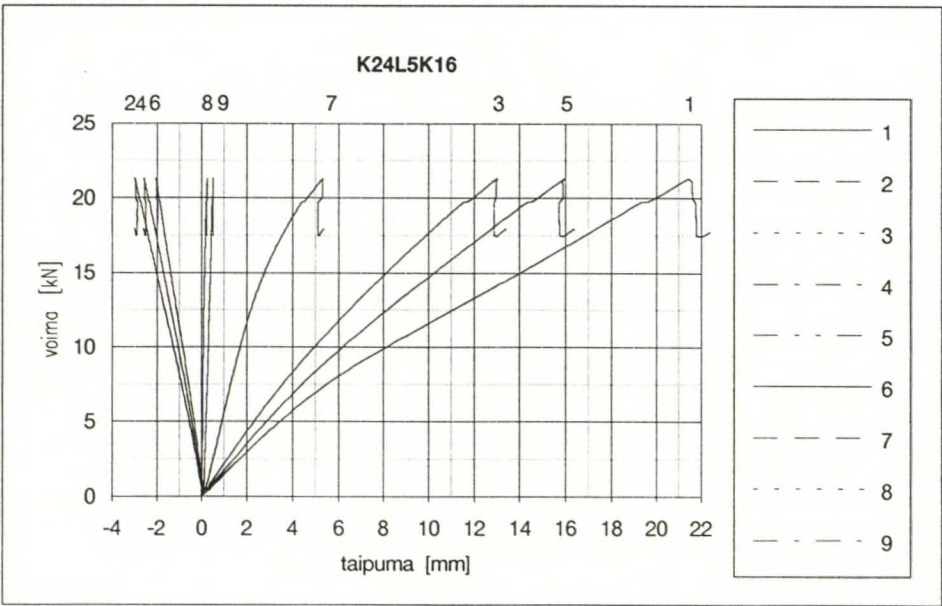
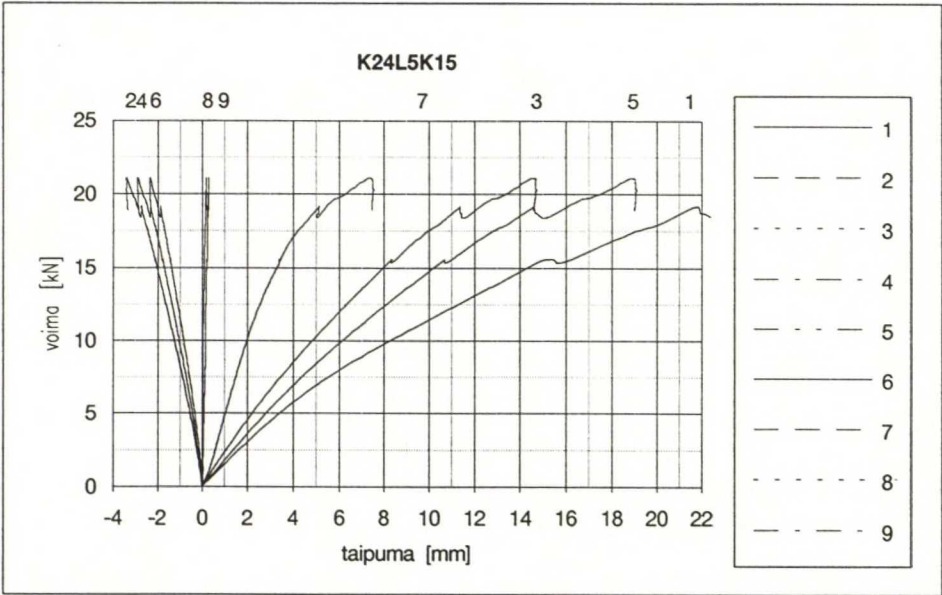
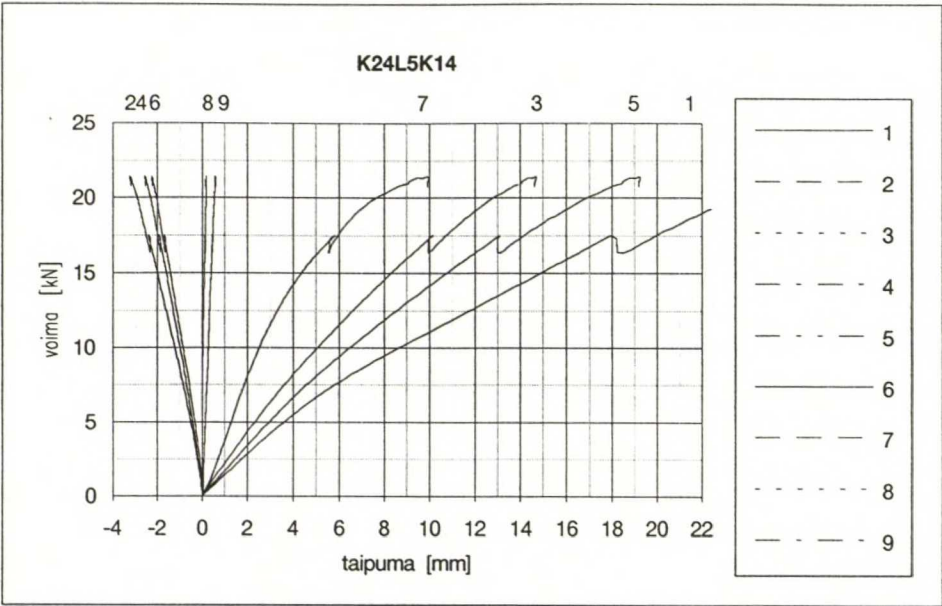
H18L2K14.XLS



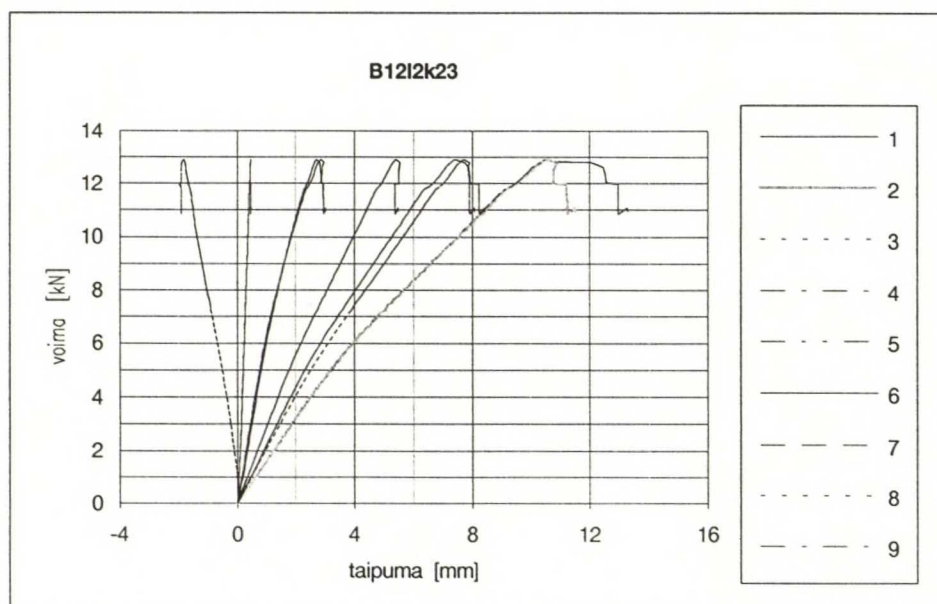
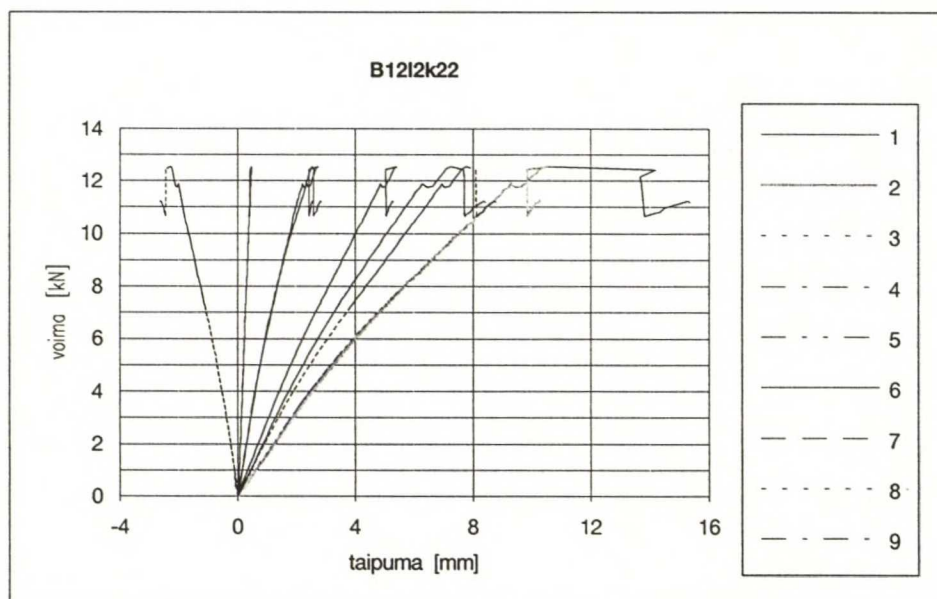
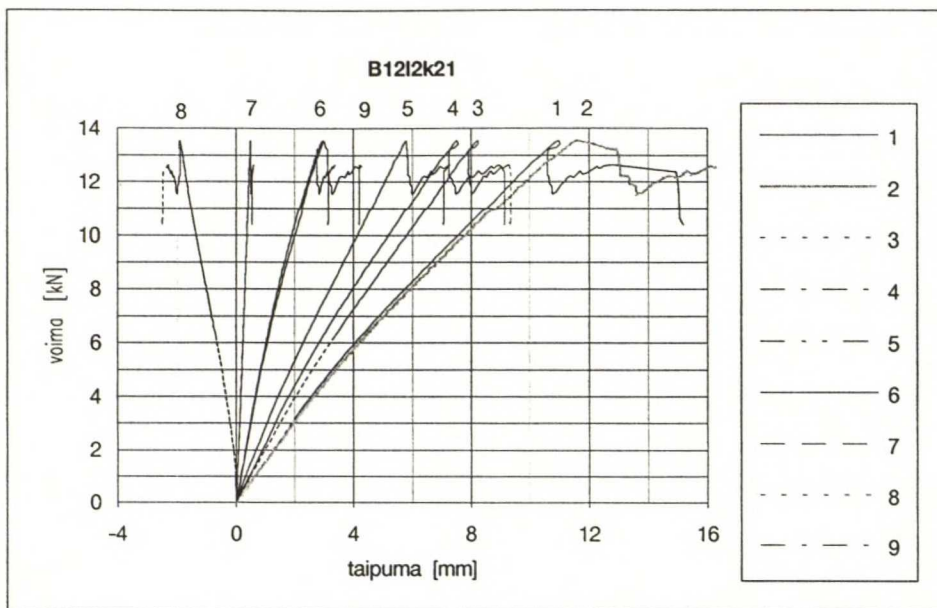
K24L3K14.XLS



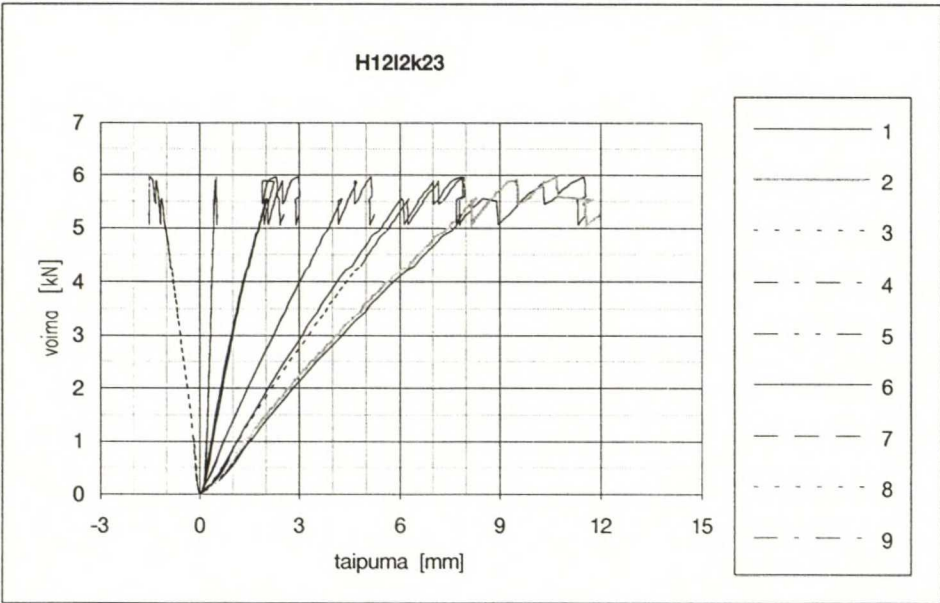
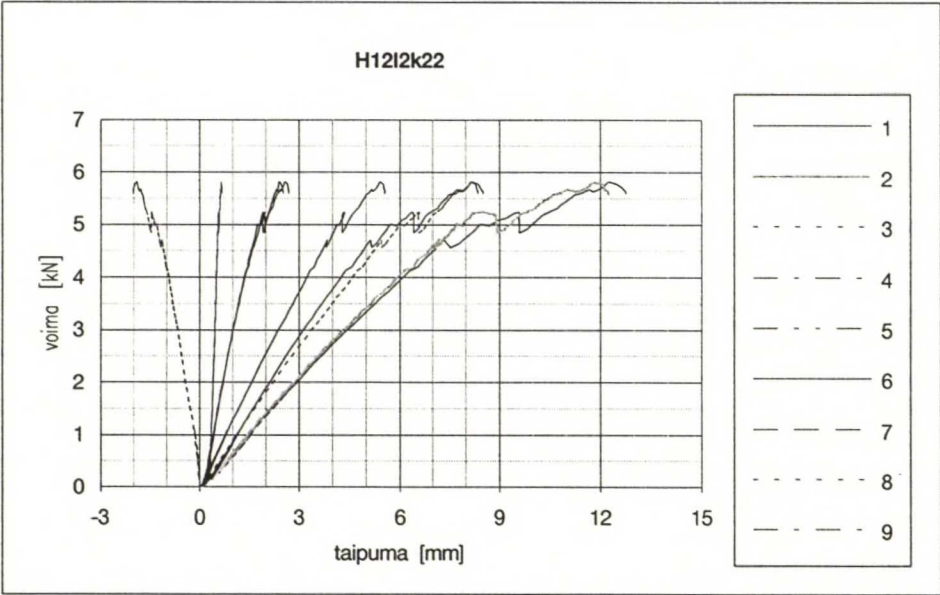
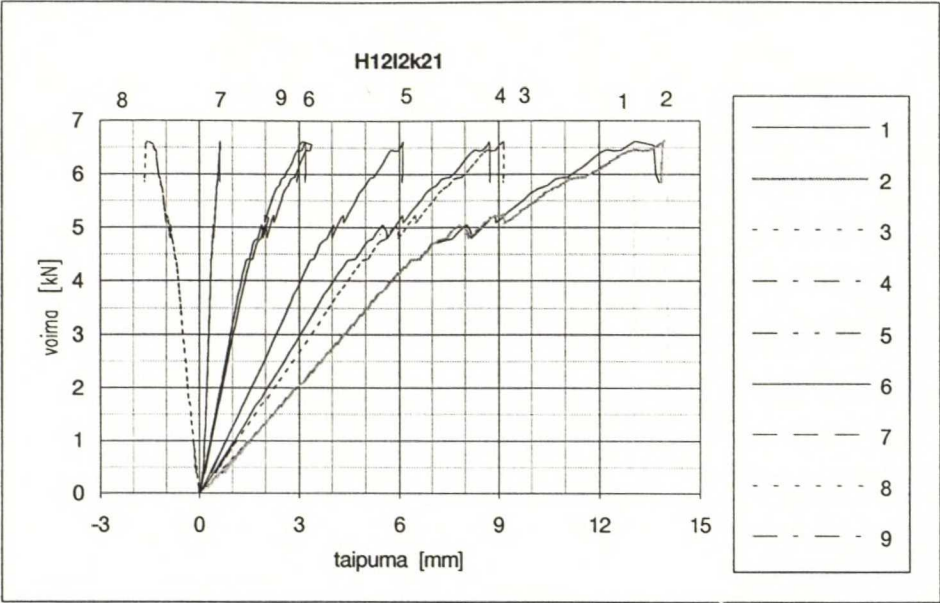
K24L5K14.XLS



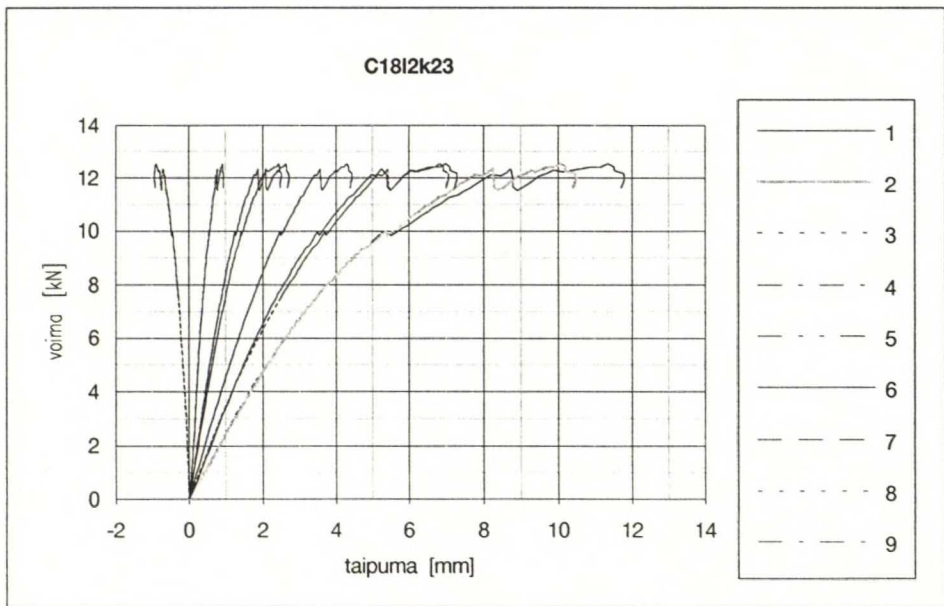
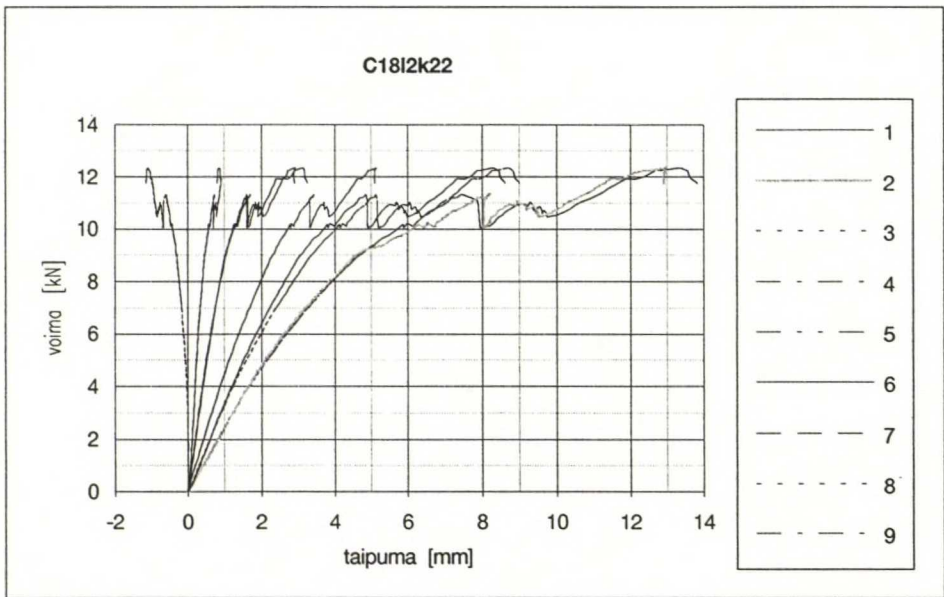
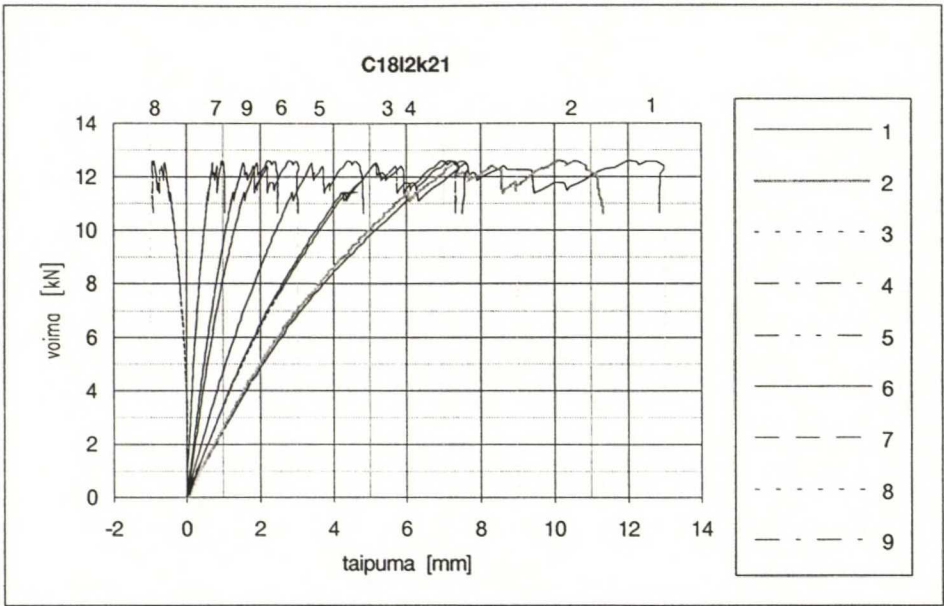
B12L2K21.XLS

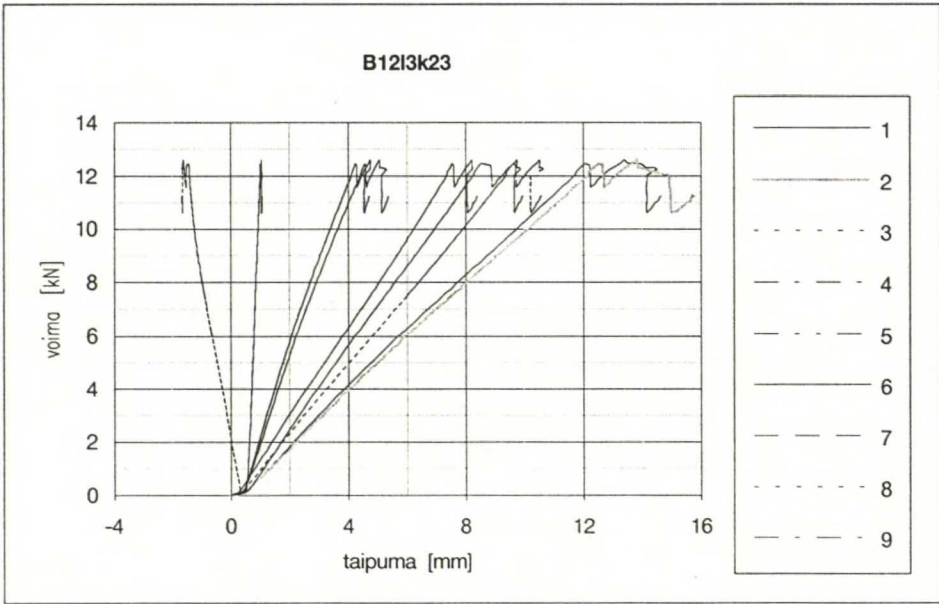
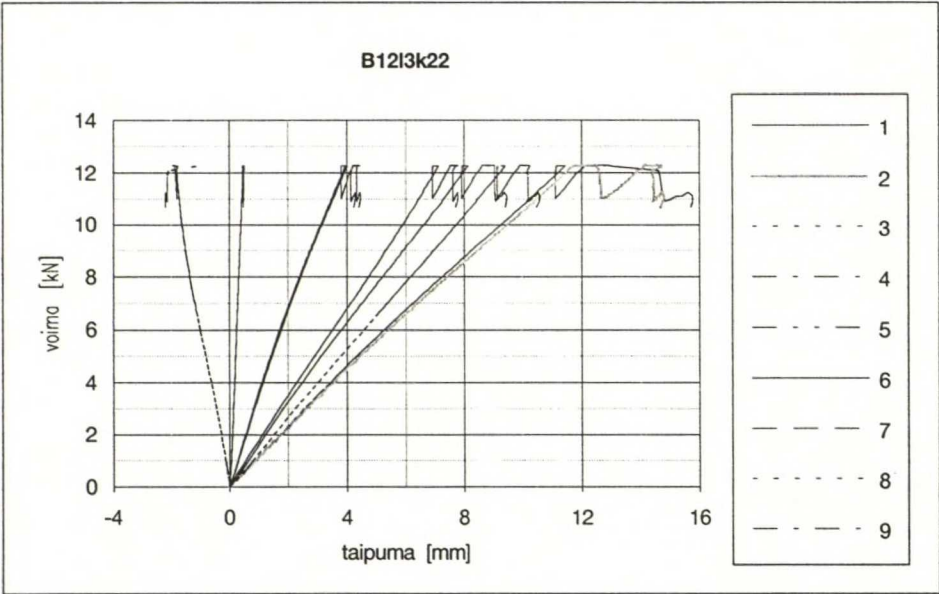
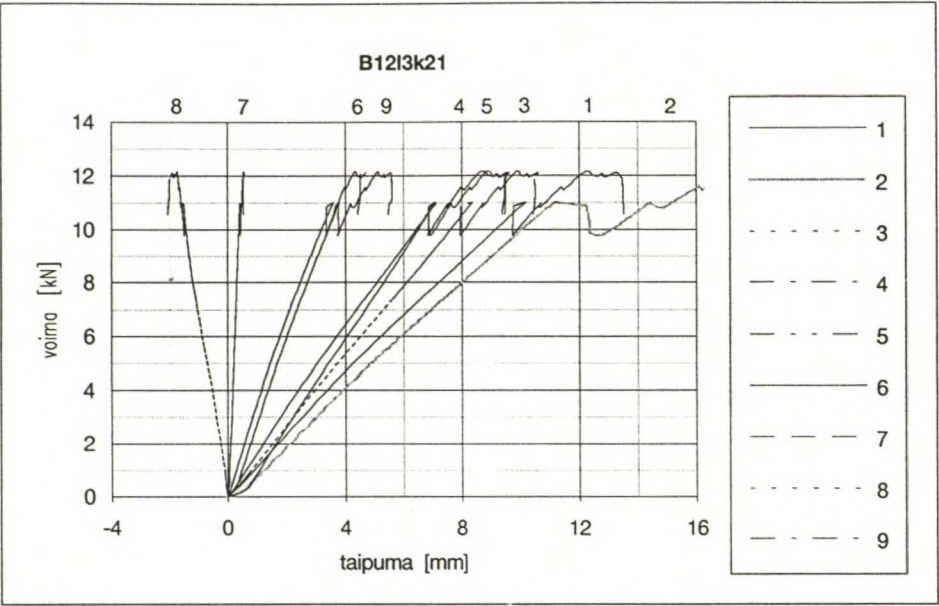


H12L2K21.XLS

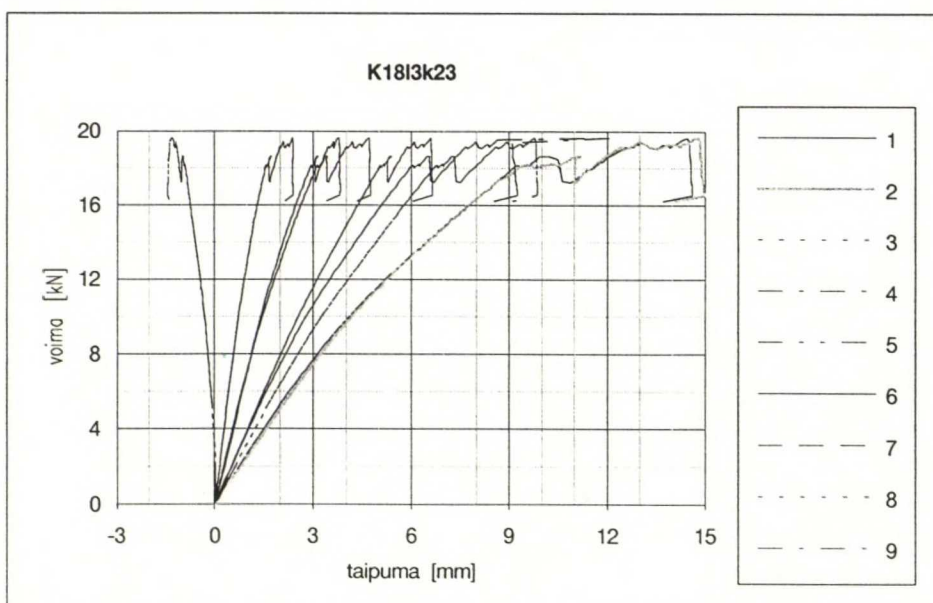
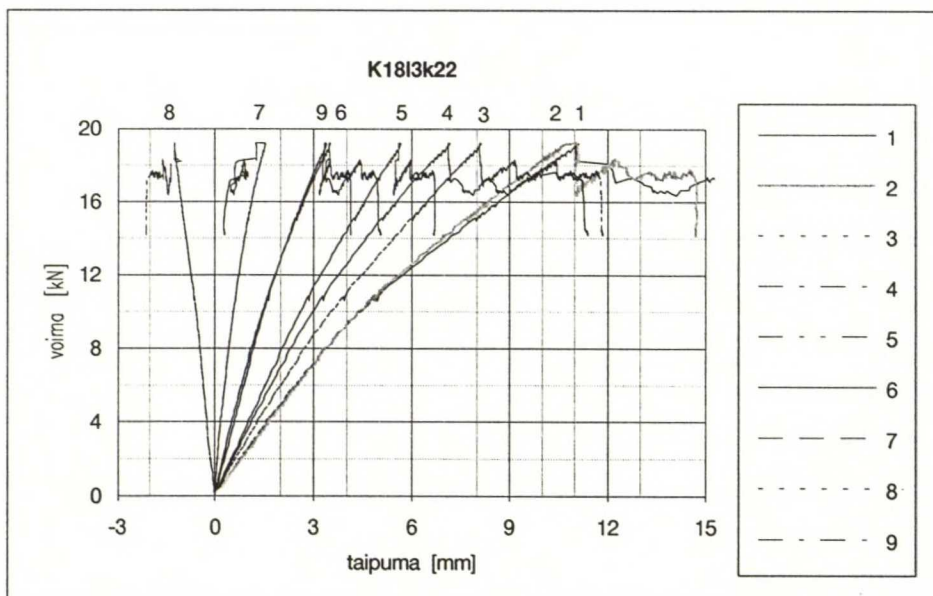
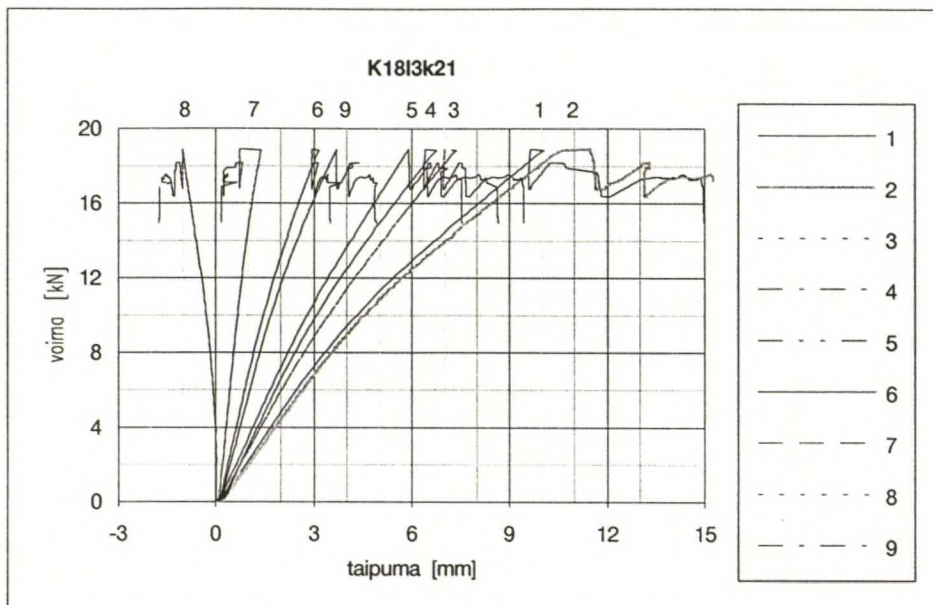


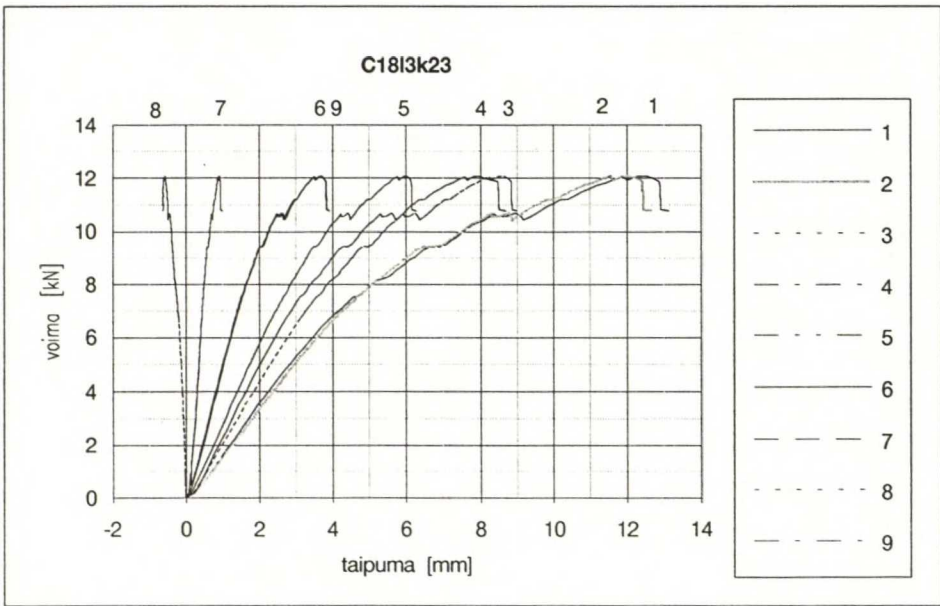
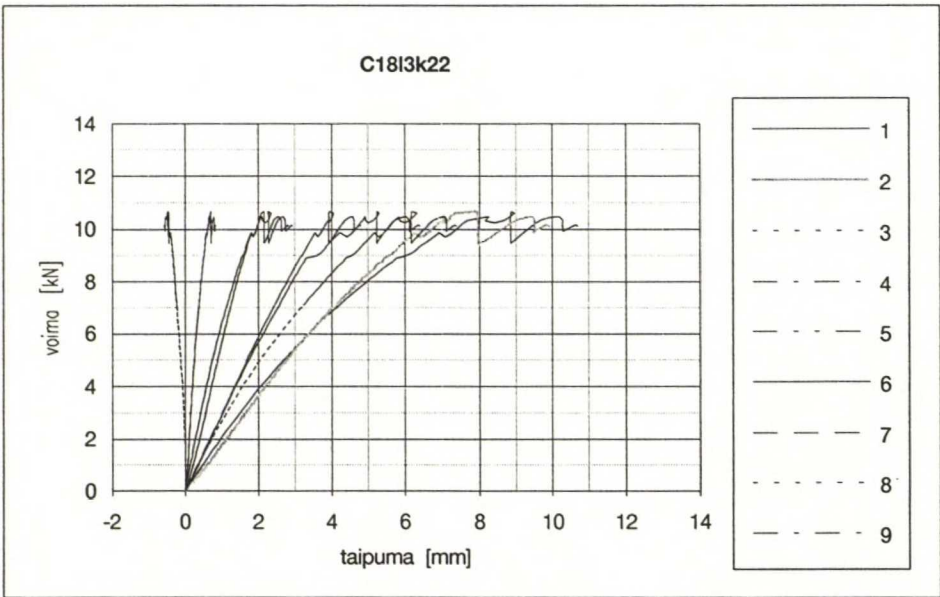
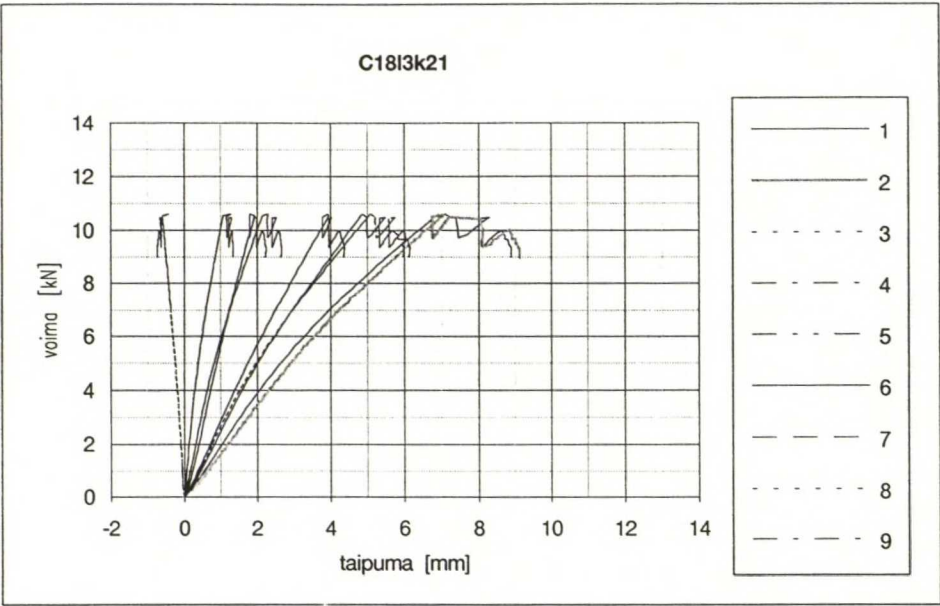
C18L2K21.XLS





K18L3K21.XLS





LIITE 4.

Esimerkki NISA-laskennasta

Eri laskentatapausten muuttujayhdistelmät.

MAT-ID A/B	property-id, lamangle-id, material-id		property-id, lamangle-id, material-id		property-id, lamangle-id, material-id
MAT-ID 1/15	1,1,1/7 1,2,1/7 1,1,1/7	MAT-ID 6/20	8,1,3/9 8,2,3/9 8,1,3/9	MAT-ID 11/25	8,1,5/11 2,2,5/11 2,1,5/11
=koivu 12 mm 10,8% 11 viilua	1,1,1/7 1,2,1/7 1,1,1/7	=koivu 12 mm 22,5% 11 viilua	8,1,3/9 8,2,3/9 8,1,3/9	=koivu 12 mm 13,0% 9 viilua	2,1,5/11 2,2,5/11 8,1,5/11
MAT-ID 2/16	4,1,1/7 4,2,1/7 4,1,1/7	MAT-ID 7/21	9,1,3/9 9,2,3/9 9,1,3/9	MAT-ID 12/26	6,1,5/11 2,2,5/11 2,1,5/11
=koivu 18 mm 10,8% 13 viilua	4,1,1/7 4,2,1/7 4,1,1/7	=koivu 18 mm 22,5% 13 viilua	9,1,3/9 9,2,3/9 9,1,3/9	=koivu 18 mm 13,0% 13 viilua	2,1,5/11 2,2,5/11 6,1,5/11
MAT-ID 3/17	1,1,1/7 1,2,1/7 1,1,1/7	MAT-ID 8/22	8,1,3/9 8,2,3/9 8,1,3/9	MAT-ID 13/27	7,1,6/13 2,2,5/14 2,1,6/13
=koivu 24 mm 10,8% 21 viilua	1,1,1/7 1,2,1/7 1,1,1/7	=koivu 24 mm 22,5% 21 viilua	8,1,3/9 8,2,3/9 8,1,3/9	=havu 18 mm 13,0% 13 viilua	2,1,6/13 2,2,5/14 7,1,6/13
MAT-ID 4/18	2,1,2/8 2,2,2/8 3,1,2/8	MAT-ID 9/23	9,1,4/10 9,2,4/10 10,1,4/10	MAT-ID 14/28	2,1,6/12 2,2,6/12 3,1,6/12
=havu 12 mm 10,8% 7 viilua	2,2,2/8 3,1,2/8 2,2,2/8 2,1,2/8	=havu 12 mm 22,5% 7 viilua	9,2,4/10 10,1,4/10 9,2,4/10 9,1,4/10	=havu 12 mm 13,0% 7 viilua	2,2,6/12 3,1,6/12 2,2,6/12 2,1,6/12
MAT-ID 5/19	7,1,2/8 3,2,2/8 2,1,2/8	MAT-ID 10/24	9,1,4/10 10,2,4/10 9,1,4/10		
=havu 18 mm 10,8% 9 viilua	3,2,2/8 3,1,2/8 3,2,2/8 2,1,2/8 3,2,2/8 7,1,2/8	=havu 18 mm 22,5% 9 viilua	10,2,4/10 10,1,4/10 10,2,4/10 9,1,4/10 10,2,4/10 9,1,4/10		

Esimerkkinä laatan K12I3K2k laskentatulokset: 12 mm koivuvaneri, jänneväli 300 mm, molempien kenttien keskipisteestä kuormitettu, kosteuspitoisuus noin 10,8 %.

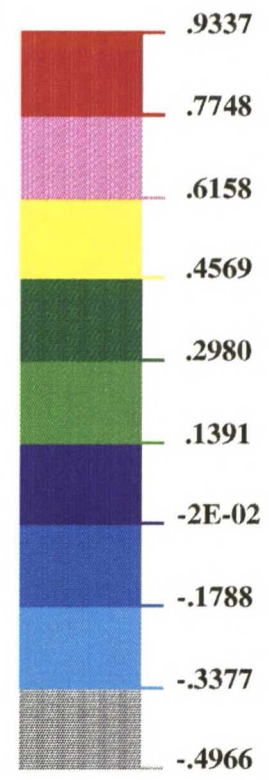
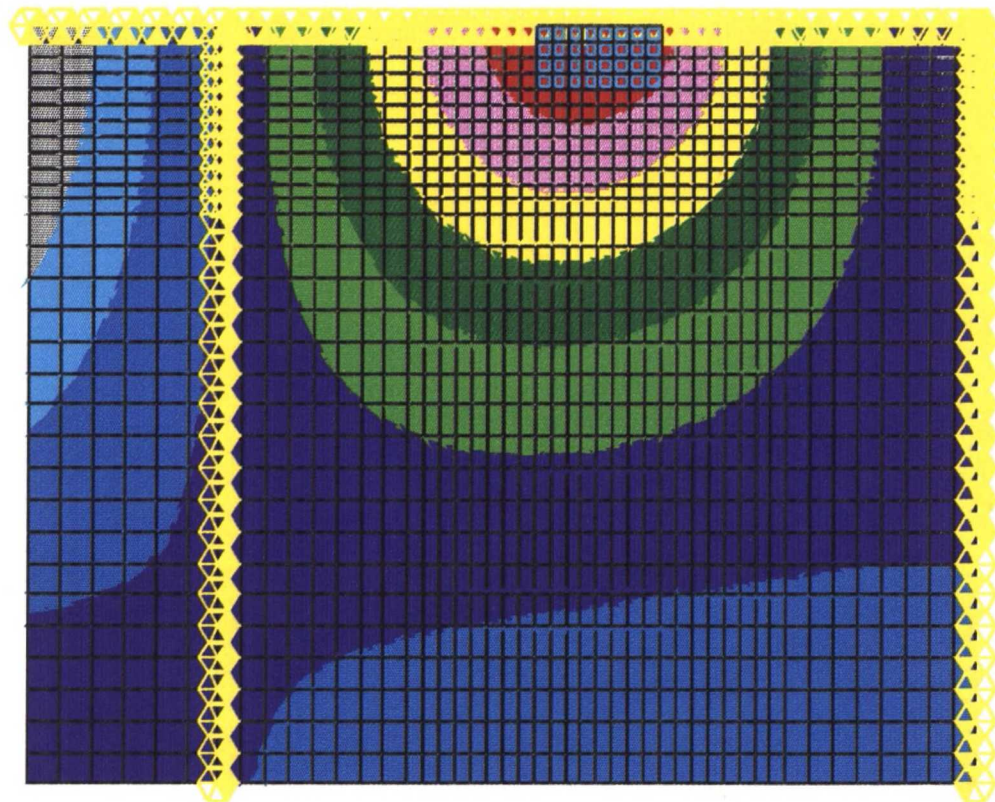
taipuma:
leikkausvoimat:
momentit:
jännitykset uloimman
viilun keskitasossa:
taipuma sivusta katsottuna:

Z-DISPLACEMENT
QX-STRS ja QY-STRS
MXX-STRS ja MYY-STRS
SXX ja SY Y
Z-DISPLACEMENT

Z - DISPLACEMENT

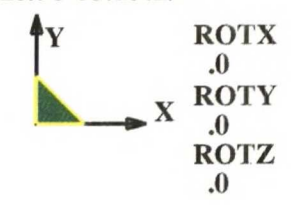
VIEW : -.4966054

RANGE: .9336846



EMRC-NISA/DISPLAY

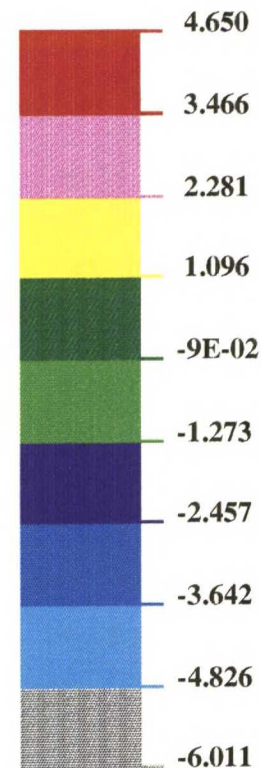
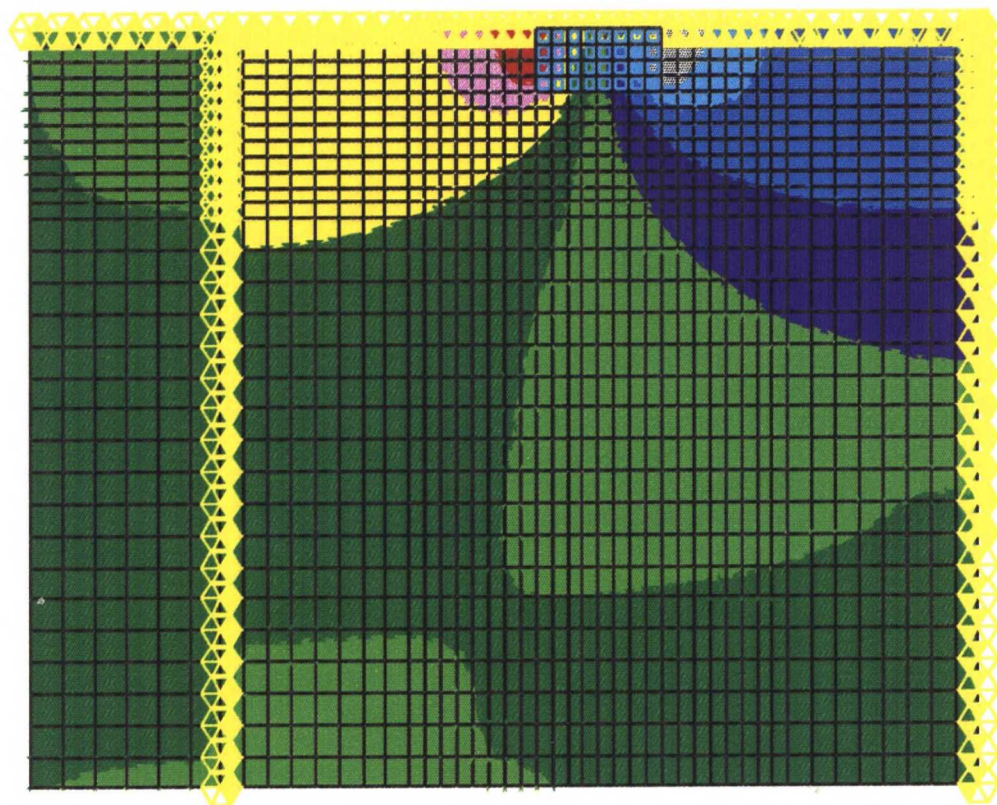
APR/25/95 08:15:29



QX-STRS. RESLT.

VIEW : -6.010815

RANGE: 4.650115



EMRC-NISA/DISPLAY

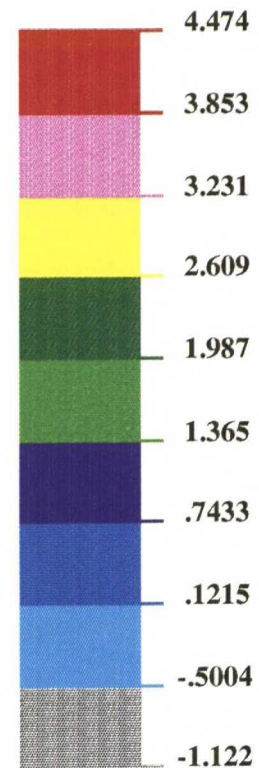
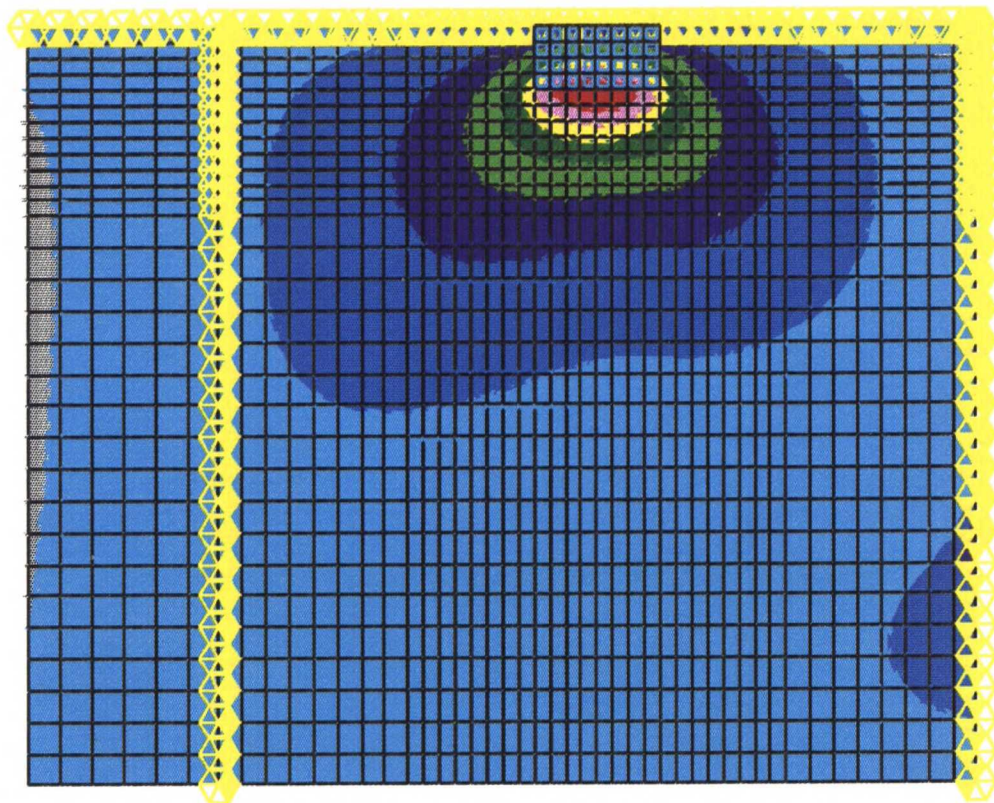
APR/25/95 08:16:07

Y
 X
 ROTX
 .0
 ROTY
 .0
 ROTZ
 .0

QY-STRS. RESLT.

VIEW : -1.122243

RANGE: 4.474498



EMRC-NISA/DISPLAY

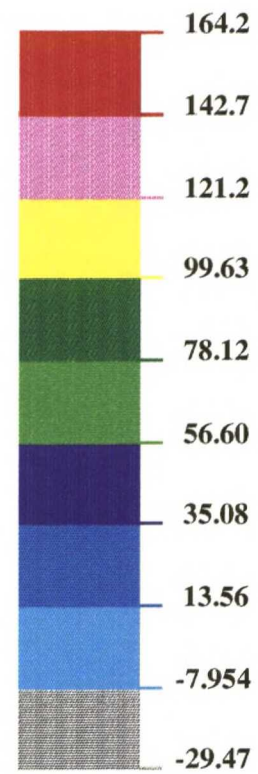
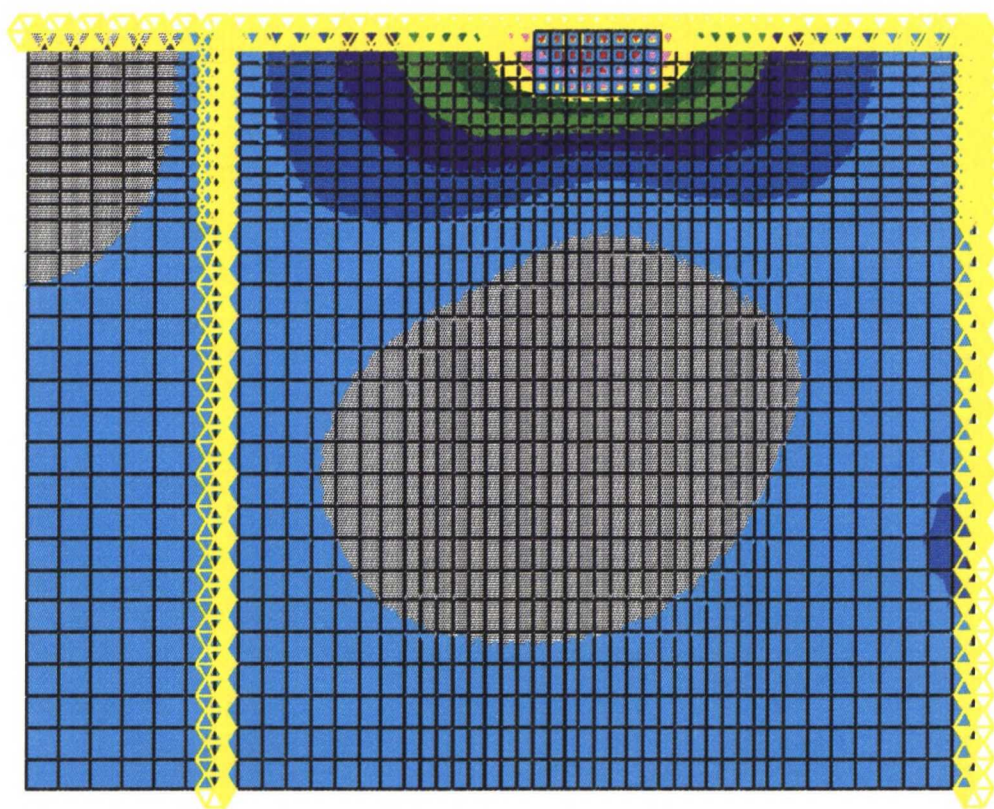
APR/25/95 08:16:48

ROTX
 .0
 ROTY
 .0
 ROTZ
 .0

MXX-STRS. RESLT.

VIEW : -29.47076

RANGE: 164.1845



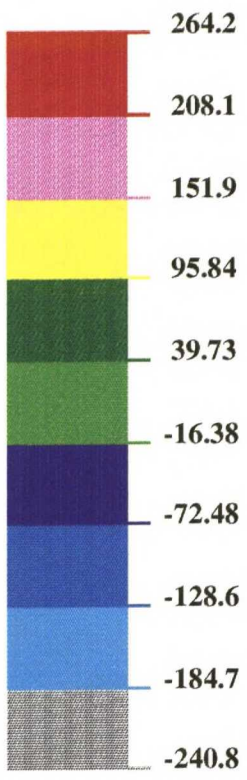
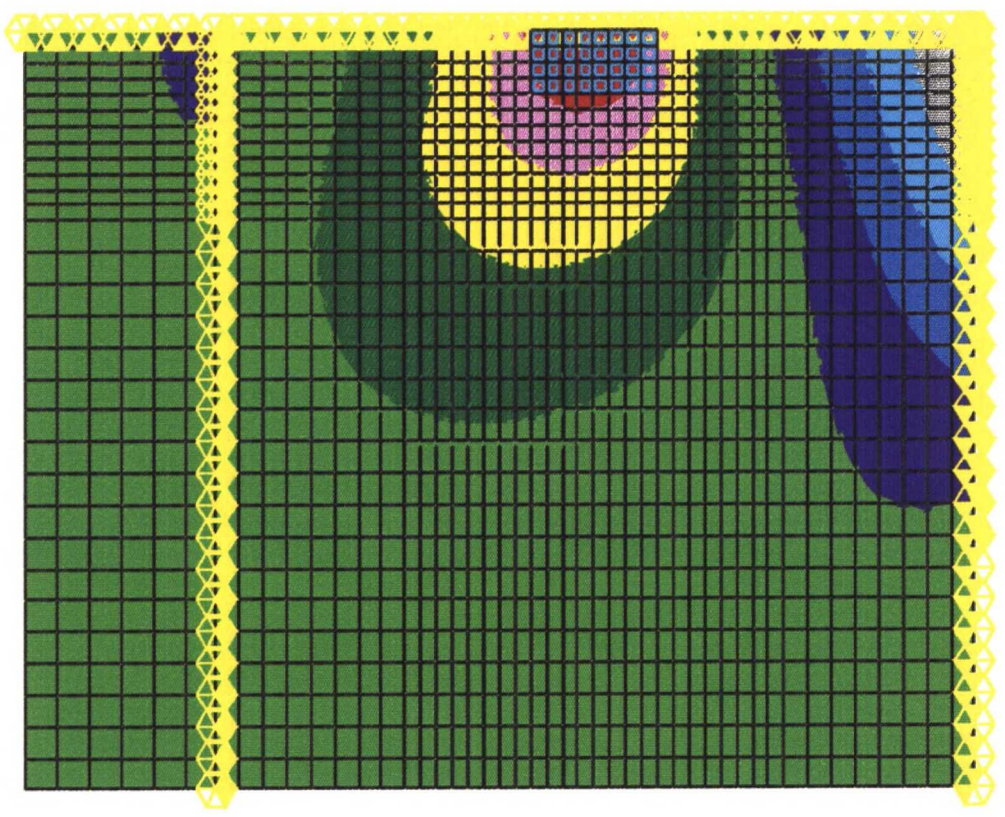
EMRC-NISA/DISPLAY

APR/25/95 08:17:23

Y
X
ROTX
.0
ROTY
.0
ROTZ
.0

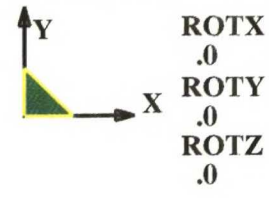


VIEW : -240.8051
RANGE: 264.1582



EMRC-NISA/DISPLAY

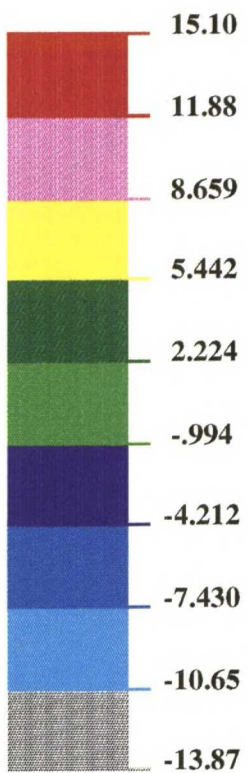
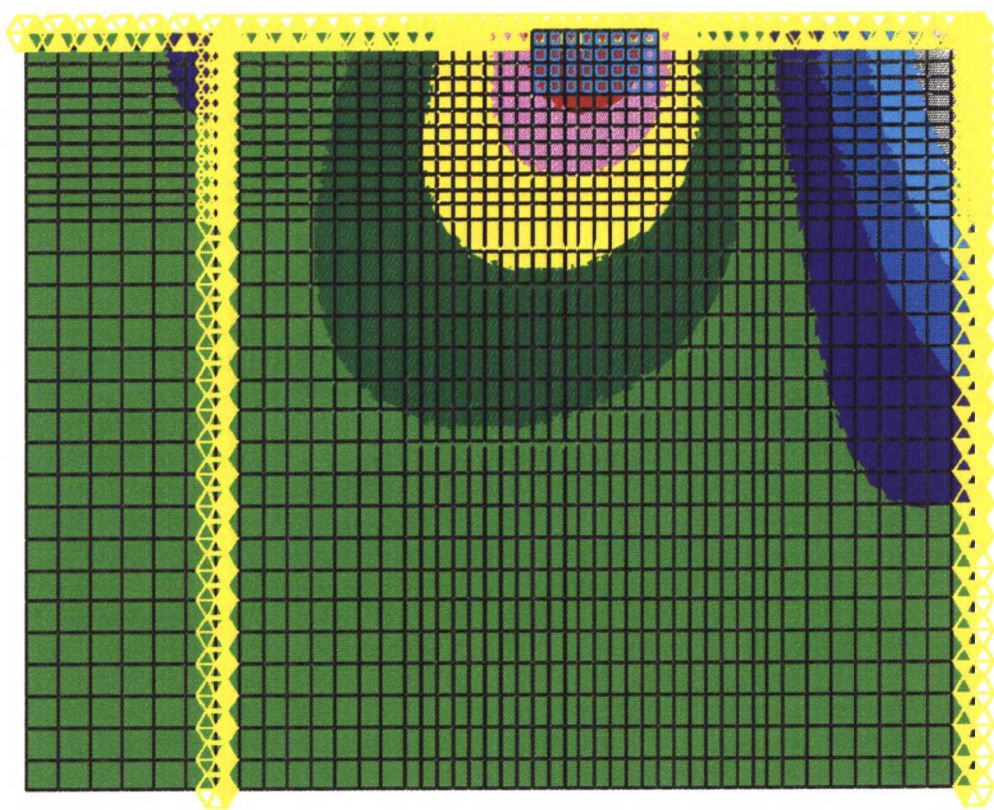
APR/25/95 08:17:56



SXX-LAYER STRESS

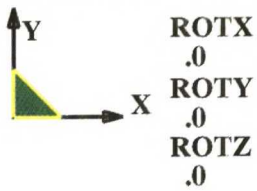
VIEW : -13.86538

RANGE: 15.09516



EMRC-NISA/DISPLAY

APR/25/95 08:18:31

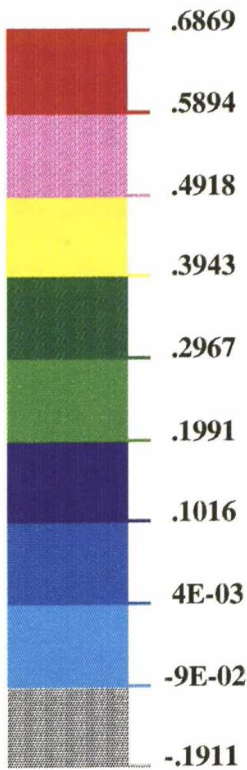
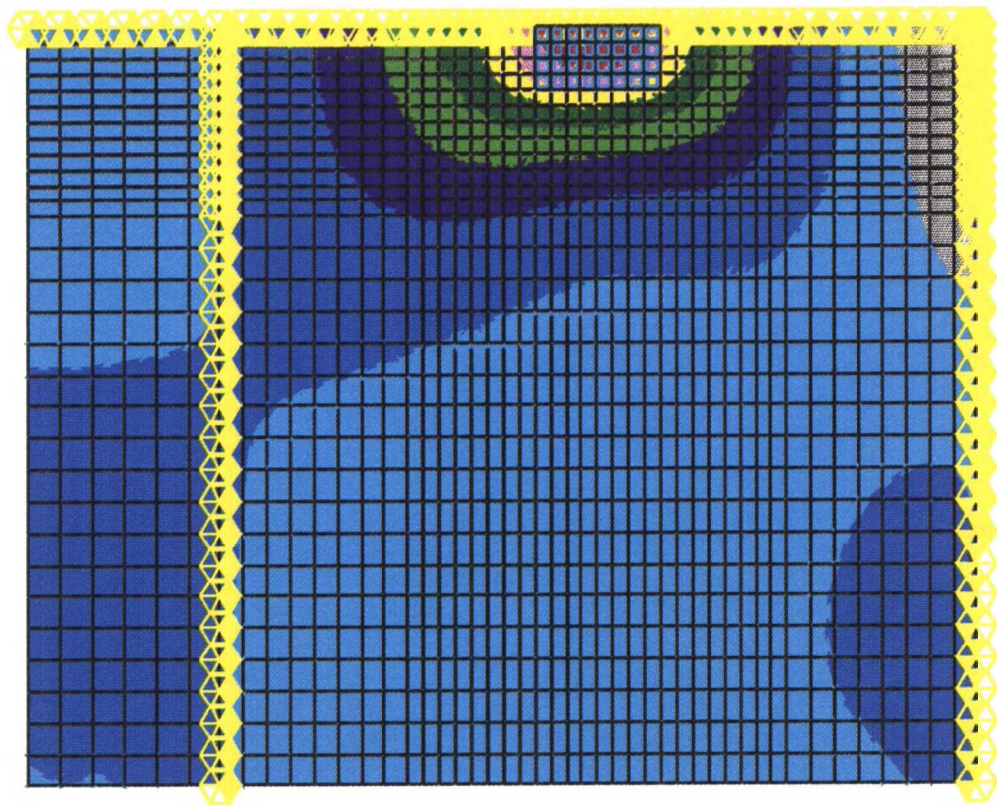


LAYER NUMBER 1

SY-Y-LAYER STRESS

VIEW : -.1910917

RANGE: .6869249



EMRC-NISA/DISPLAY

APR/25/95 08:19:08

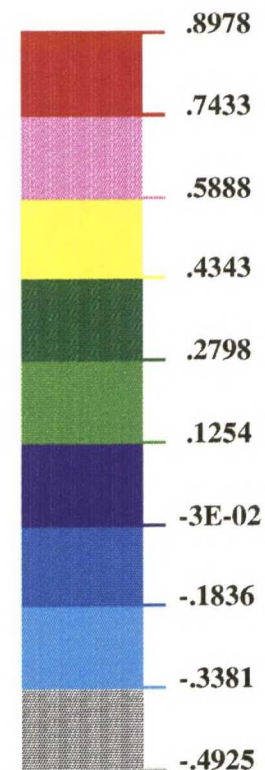
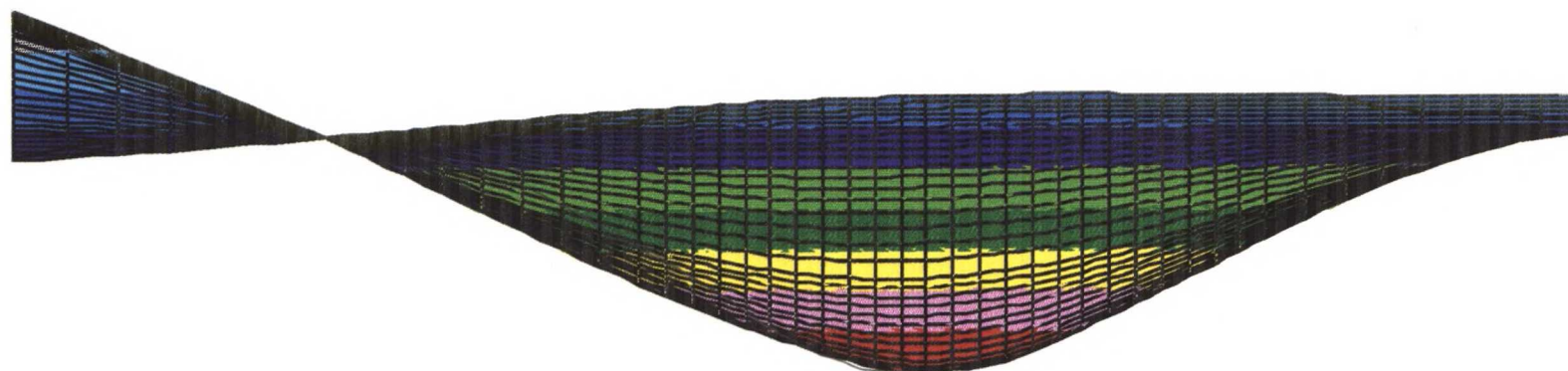
Y
X
ROTX
.0
ROTY
.0
ROTZ
.0



LAYER NUMBER 1

VIEW : -.4925317

RANGE: .897751



EMRC-NISA/DISPLAY

APR/26/95 14:34:36



LAYER NUMBER 1

